



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## ROTAČNÍ SUŠÍČÍ A SINTROVACÍ PECE

ROTARY DRYING AND SINTERING KILNS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Svatomír Rafaj

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Bc. Svatomír Rafaj</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Pavel Skryja, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Rotační sušící a sintrovací pece**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pece jsou zařízení s uzavřeným a od okolního prostředí izolovaným pracovním prostorem, ve kterém se uskutečňuje přestup tepla na vsázku. Práce je zaměřena na problematiku rotačních pecí, které jsou v průmyslu používány pro nízko i vysokoteplotní zpracování materiálu. Účelem diplomové práce je provést rešerši stávajících známých uspořádání rotačních pecí a nových trendů v této oblasti. V rámci experimentu provést a schematicky zobrazit vlastní proces zpracování materiálu. Z experimentálních dat zpracovat materiálovou a tepelnou bilanci.

### **Cíle diplomové práce:**

- Popsat základní způsoby využití rotačních pecí v praxi. Uvést konkrétní technologické data.
- Zpracovat přehled různých technologických uspořádání rotačních pecí.
- Na základě experimentálních dat získaných ze zkoušek na zkušebně pecí zpracovat materiálovou a tepelnou bilanci konkrétního zpracovaného materiálu.

### **Seznam doporučené literatury:**

PERRY, Robert H., GREEN, Don W., Perry's chemical engineers' handbook. Seventh edition. USA, The McGraw-Hill, 1997. 2200 s. ISBN 0-07-049841-5

TSCHEG, S. H., and WATKINSON A. P.. Convective heat transfer in a rotary kiln. The Canadian Journal of Chemical Engineering 57.4, 1979, 433-443.

BAUKAL, Charles E., ed. Heat transfer in industrial combustion. CRC press, 2000.568 s. ISBN 0849316995

SIMPSON, William T., Dry kiln operator's manual, Manual. Agric. Handbook AH-188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory 188, 1991, 273 s. ISBN 0-16-035819-1

EARLE, John S., Rotary kiln incineration of hazardous wastes: pilot-scale studies at Louisiana State University (2003). LSU Doctoral Dissertations. 1102.  
[https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/1102](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/1102)

BOATENG, Akwasi, Rotary Kilns, Butterworth-Heinemann, 2008. 368 s. ISBN 9780080557120

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou rotačních sušících a sintrovacích pecí. První část práce pojednává o konstrukčním řešení těchto pecí, procesech, které v nich probíhají a o různých možnostech jejich technologických zapojení. V druhé části jsou provedeny dva experimenty. První se zabývá určením zdržné doby materiálu v bubnu sušící rotační pece v závislosti na frekvenci otáčení a sklonu rotační pece. Zkoušky vyhodnotily zvláště závislost zdržné doby na frekvenci otáčení a sklonu pece. Z těchto dat byla stanovena regresní rovnice, která popisuje závislost zdržné doby na frekvenci otáčení a sklonu pece. Výsledky regresní rovnice, v porovnání s rovnicemi z literatury, umožňuje přesnější výpočet zdržné doby (s odchylkou jedné minuty) pro daný materiál a podmínky sušení. Druhý experiment je zaměřen na sestavené materiálové a tepelné bilance konkrétního sušícího procesu. Materiálem byl vlhký drcený tetrapack. Byly stanoveny technologické podmínky pro tento materiál, potřebný příkon hořáku a tepelné ztráty distribuce tepla mezi materiálem a spaliny. Při sušení materiálu bylo odvedeno téměř 80 procent tepla spaliny. Zbýlých 20 procent bylo rozděleno mezi latentní teplo (potřebné na odpaření vody z materiálu), materiál a tepelné ztráty povrchem pláště.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Rotační pec, sušení, sintrování, souprroudý, protiproudý, materiálová a tepelná bilance

## **ABSTRACT**

This thesis deals with rotary drying and sintering kilns. The first part focused upon construction of the kilns, kiln processes and the options of technological arrangement of the kilns. The thesis second part presents two experiments. The first one is targeted to find the relation between residence time, kiln rotary speed and kiln slope in longitudinal direction. The examinations analysed individually the relation between kiln rotary speed and residence time and the relation between kiln slope and residence time. Finally, the regression equation describing the relation between holding time, kiln rotary speed and kiln rake was established. The results given by regression equation much closer to the real one than the results given by literature. The difference between real residence time and the regression one is about one minute. The second one is concerned with producing a set of equations with respect of mass and heat balance in case of drying process. The input material was wet crushed tetra packs. There were established technological conditions of the material, necessary burner energy input, heat losses and distribution of heat between material and flue gas. There were taken away almost 80 percent of heat energy by flue gases. The remaining 20 percent was divided between latent heat, material and heat losses through the shell of the rotary kiln.

## **KEYWORDS**

Rotary kiln, drying, sintering, co-current, counter-current, mass and heat balance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RAFAJ, S. *Rotační sušící a sintrovací pece*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce na téma „Rotační sušící a sintrovací pece“ je mým původním dílem, zpracoval jsem jí samostatně pod vedením Ing. Pavla Skryji, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu, jež je součástí této práce.

V Brně dne 25. května 2018

.....  
Bc. Svatomír Rafaj

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Skryjovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost, kterou mi během zpracování diplomové práce věnoval. Děkování patří také Ing. Josefu Hopjanovi, CSs. a Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D. za poskytnutí cenných informací potřebných ke zkompletování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, především své manželce Andrejce, za podporu během studia.

# OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Stručná historie rotačních pecí.....	10
3	Rotační pece.....	12
3.1	Sintrovací rotační pece .....	12
3.1.1	Probíhající procesy .....	12
3.2	Sušicí rotační pece.....	13
3.2.1	Sušicí proces .....	14
4	Konstrukce rotačních pecí .....	15
4.1	Rotační válec .....	16
4.1.1	Plášť .....	16
4.1.2	Vyzdívka (sintrovací rotační pece).....	16
4.1.3	Úpravy materiálového lóže .....	17
4.1.1	Nosné obruče .....	19
4.2	Rotační mechanismus.....	19
4.2.1	Řetězový mechanismus.....	19
4.2.2	Převodový mechanismus .....	20
4.2.3	Třecí mechanismus .....	21
4.3	Hořák.....	22
4.3.1	Paliva .....	23
4.3.2	Plamen .....	23
4.4	Vstupy a výstupy.....	24
4.4.1	Přívod vsázky.....	24
4.4.2	Odvod produktu .....	25
4.4.3	Odvod spalin .....	29
4.5	Technologické doplňky .....	30
4.5.1	Knocking systém.....	30
4.5.2	Předehříváče a předkalcinátory.....	32
5	Technologické uspořádání .....	34
5.1	Podle způsobu ohřevu .....	34
5.1.1	Přímý ohřev.....	34
5.1.2	Nepřímé ohřev .....	34
5.2	Rozdělení pecí dle proudění vzduchu .....	35
5.2.1	Souproudé uspořádání.....	35

5.2.2	Protiproudé uspořádání .....	37
6	Průmyslové aplikace .....	38
7	Přenos tepla.....	40
7.1	Mechanismy přenosu tepla.....	40
7.1.1	Kondukce .....	40
7.1.2	Radiace.....	40
7.1.3	Konvekce .....	40
7.2	Teplotní profil .....	41
8	Experimenty.....	44
8.1	Měřicí stanoviště .....	44
8.2	Experiment č. 1 .....	46
8.2.1	Popis.....	46
8.2.2	Výsledky měření .....	48
8.2.3	Určení zdržné doby materiálu.....	50
8.2.4	Závislost zdržné doby na frekvenci otáčení a sklonu bubnu .....	54
8.2.5	Posouzení sušícího procesu .....	56
8.3	Experiment č. 2 .....	57
8.3.1	Popis.....	57
8.3.2	Materiálová bilance.....	59
8.3.3	Tepelná bilance .....	59
9	Závěr .....	65
10	Bibliografie .....	66
11	Seznam symbolů a zkratk .....	68
12	Seznam obrázků.....	70
13	Seznam tabulek.....	72

# 1 Úvod

Rotační pece jsou multifunkční zařízení, které se používá ke zpracování pevných látek tepelnými procesy jako je sušení, spalování, ohřev, kalcinace nebo sintrování, ale také mechanickými procesy jako je například míchání. Nejčastěji jsou rotační pece využívány při výrobě cementu, což je proces, pro který byly rotační pece původně vynalezeny. Jejich univerzálnost však umožňuje jejich využití také v jiných aplikacích, jako například ve spalovnách komunálních odpadů. Rotační pec se stala páteřním článkem mnoha nových průmyslových odvětví. Důsledkem těchto aplikací probíhá neustálý vývoj a zdokonalování těchto zařízení. [1] [2]

Diplomová práce je rozdělena na rešeršní a experimentální část.

V rešeršní části je popsána konstrukce rotačních pecí, jejich využití a možnosti jejich technologických uspořádání. Rotační pece jsou od začátku práce členěny na sušící a sintrovací rotační pece. Sušící rotační pece jsou určeny k odstraňování vody z vlhkých materiálů, zatímco pomocí sintrovacích rotačních pecí je docíleno změny materiálové struktury a tím také materiálových vlastností. V rešeršní části jsou popsány procesy probíhající v rotačních pecích, konstrukční řešení jednotlivých částí pecí a také možnosti jejich použití.

Pro vypracování experimentální části byly stanoveny tyto cíle:

- Stanovit závislost zdržné doby konkrétního materiálu v bubnu rotační pece na frekvenci otáčení a sklonu bubnu rotační pece
- Vytvořit matematickou závislost zdržné doby na konkrétních parametrech
- Vytvořit materiálovou bilanci sušícího procesu
- Vytvořit tepelnou bilanci sušícího procesu
- Stanovit materiálové a tepelné ztráty rotační pece

## 2 Stručná historie rotačních pecí

Vývoj rotačních pecí byl úzce spjatý s vývojem zpracování vápna a cementu. Základ vývoje cementu položili Egypťané mezi léty 3000 a 300 před našim letopočtem, díky čemuž byli schopni budovat obrovské projekty, jako jsou například pyramidy. Následovala je Čína, kde materiálová směs podobná cementu dala za vznik slavné Velké čínské zdi. [3]

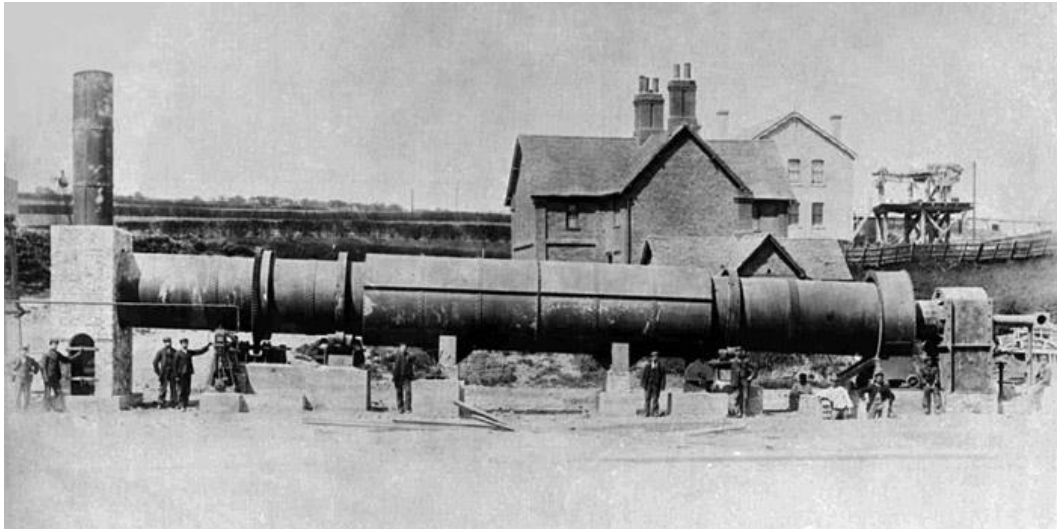
První zmínky o pecích, tehdy ještě hliněných, se datují více než 2000 let do minulosti, kdy je využívali Římané k pálení vápna. Podobné pece byly nalezeny také v Americe, Kalifornii, kde je původní Mexičané využívali také k výrobě vápna z vápence. V 19. století se v Americe začaly konstruovat první komínové pece (obr. 2.1), které byly stavěny ještě jako pece vertikální.



Obr. 2.1 První komínové pece (Kalifornie) [1]

Základ moderním rotačním pecím položil v roce 1885 Frederick Ransome, který si nechal v Anglii patentovat první funkční rotační pec. Tyto pece, označovány jako Ransomovy pece, byl sice pokrokový vynález, avšak stále bylo potřeba mnoho let práce, než byly vyvinuty opravdu plně funkční a spolehlivé rotační pece. Ransomovy pece měřily 45 centimetrů v průměru, byly dlouhé 4,5 metru a postupně vytlačily všechny ostatní varianty pecí, ve kterých docházelo k výrobě cementu a vápna. Na obr. 2.2 je zobrazena první Britská rotační pec z roku 1901, kterou vytvořila společnost Martin Earle [4]. Jak šel vývoj rotačních pecí dál, tak se také tyto pece postupně zvětšovaly. Například v 60. letech 20. století se pro cementářský průmysl vyráběly pece s rozměry až 6,5 metru v průměru a délkou 238 metrů. Tento enormní růst velikostí pecí však s sebou přinesl také mnoho problémů spojené se snížením životnosti pecí, nedostatečným chlazením či

častým selháváním mechanických součástí pecí. Toto vše a energetická krize vedla k revoluci v konstrukci těchto zařízení. Úspora paliva se stala prioritou pro většinu společností, což vedlo k rozvoji stávajících technologií a začleňování prvků zefektivňujících probíhající proces, jako jsou například předehřívací kolony. [1]



*Obr. 2.2 První Britská rotační pec [4]*

Dnešní rotační pece jsou moderní zařízení, jejichž vývoj trval více než jedno století a stále trvá. Jsou univerzální, konstruují se v rozmanitých velikostech dle požadavků jednotlivých provozů a jsou osazeny nejmodernějšími technologickými prvky.

### 3 Rotační pece

Rotační pece dělíme na dvě hlavní skupiny. Sušící rotační a sintrovací rotační pece, ve kterých, na rozdíl od běžných sušících pecí, dochází vlivem tepla ke změně struktury zpracovávaného materiálu. Z konstrukční stránky se od sebe tyto pece příliš neliší, avšak jejich praktická aplikace je velmi odlišná. V následujících podkapitolách budou jednotlivé rotační pece více popsány.

#### 3.1 Sintrovací rotační pece

Sintrovací rotační pece (obr. 3.1), jsou pece, ve kterých dochází k chemické reakci nebo dochází ke změně struktury materiálu. Toho je docíleno udržováním materiálu na specifické teplotě pro předem určený časový úsek. Tyto teploty a zdržný čas je určen z teplotních profilů založených na chemické a tepelné analýze zpracovávaného materiálu. Sintrovací rotační pece dokáží běžně pracovat v teplotním rozmezí až 850–1400 °C [5].

Sintrovací pece se díky tomu využívají pro celou řadu procesů, například pro kalcinaci, tepelnou desorpci, organické spalování, tepelné povrchové úpravy či sintrování samotné. [1]



Obr. 3.1 Sintrovací rotační pece [6]

##### 3.1.1 Probíhající procesy

- **Kalcinace**

Kalcinace je proces, při kterém dochází k chemické separaci při vysokých teplotách. Využívá se především k získání anorganických materiálů. Například výroba vápna, kdy dochází ke vzniku oxidu vápenatého a oxidu uhličitého z uhličitanu vápenatého.

- **Termální desorpce**

Termální desorpce je proces, při kterém dochází k oddělení těkavé látky ze vstupní směsi. Metoda se zakládá na různých bodech varu jednotlivých složek. Využívá se například k odstraňování pesticidů z písku. V rotační peci je udržována taková teplota, aby docházelo k odpařování pesticidů bez nežádoucího tavení vsázky.

- **Organické spalování**

Organické spalování je proces, při kterém spalováním vsázky chceme získat menší objem. Využívá se běžně ve spalovnách komunálních odpadů, kde je snaha snížit objem odpadů před uložením na skládku a získat z něj maximální množství energie, která by mohla být vhodně využívána například k topným účelům.

- **Sintrování**

Sintrování je proces, při kterém je surový materiál zahříván na teplotu blízkou její teploty tání, čímž se zlepšují pevnostní vlastnosti dané vsázky.

- **Tepelné povrchové úpravy**

Tepelné povrchové úpravy jsou procesem, při kterém dochází k pokrytí tepelně odolnějšího materiálu (jádra) materiálem méně tepelně odolným. Tento materiál začíná při určité teplotě tát a rovnoměrně pokrývá stěnu pevného materiálu. Tato metoda povrchových úprav se od ostatních, netepelných, metod liší rovnoměrnějším krytím a silnějším přilnutím krycí vrstvy k upravovanému jádru.

- **Redukce kyslíku oxidem uhelnatým**

Redukce kyslíku oxidem uhelnatým je proces, při kterém je z vsázky, převážně pomocí oxidu uhelnatého, odstraňován kyslík, který by byl nežádoucí příměsí v dalších technologických krocích.

### 3.2 Sušící rotační pece

Technologie průmyslového sušení se vyvíjí už stovky let. Na začátku se jako sušící element využívalo slunce a vítr, což byl ovšem zdoluhavý proces. S požadavkem na rychlejší sušení bylo nezbytné nalézt lepší metody, jak teplo a proudění vzduchu kontrolovaně využívat k maximalizování sušícího procesu. Na začátku se k sušení materiálů využívaly klasické pece, které byly s rozvíjejícím se průmyslem nahrazeny dnešními sušícími systémy. Sušící proces se od jeho začátků mnohonásobně urychlil a je i nadále vyvíjen a zlepšován. Sušící zařízení jsou pokročilejší se stále zvyšující se účinností. [7]

Sušící rotační pece (obr. 3.2) našly své bezkonkurenční průmyslové uplatnění v procesu sušení většiny sypkých materiálů. Schopnost zpracovávat velké množství rozdílných materiálů, robustní konstrukce, spolehlivost a flexibilita pomohla rotačním pecím expandovat téměř do všech průmyslových odvětvích. Sušící rotační pece nejsou využívány pouze při zpracovávání nerostných surovin a výrobě zemědělských hnojiv, ale v celé řadě průmyslových odvětvích včetně potravinářského či chemického průmyslu.



Obr. 3.2 Sušící rotační pec [9]

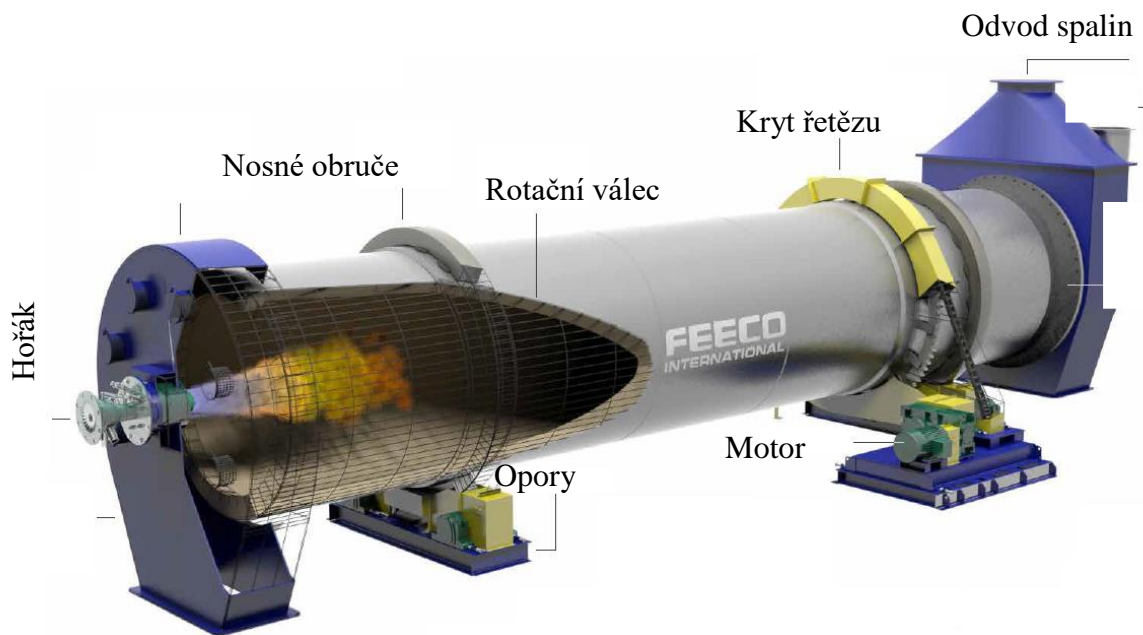
### 3.2.1 Sušící proces

Jedná se o proces, při kterém je odstraňována zadržovaná kapalná fáze (vlhkost) z tuhé fáze. Tohoto lze dosáhnout různými metodami, které se dělí na mechanické, fyzikálně-chemické a tepelné, což jsou právě metody, které probíhají v rotačních sušících pecích. Nutný předpoklad pro sušení je ten, že sušený materiál musí být „vlhčí“ než sušící médium. Vlhkému materiálu je nutno dodat minimálně tolik tepla, aby byla kapalina v materiálu převedena na páry. Je tedy nutno dodat teplo potřebné k zahřátí vsázky na teplotu varu odpařované kapaliny a její výparné teplo. Sušícím médiem je v případě rotačních pecí proud přehřátého vzduchu. Z hlediska sdílení hmoty se jedná o děj difúze, která probíhá ve dvou krocích. Vnější difúze se odehrává, jak z názvu vyplývá, na povrchu sušeného materiálu, kde povrchová vlhkost přechází do proudu vzduchu. Vnitřní difúze naopak probíhá uvnitř sušeného materiálu a jedná se o postup vlhkosti směrem k jeho povrchu. [8]

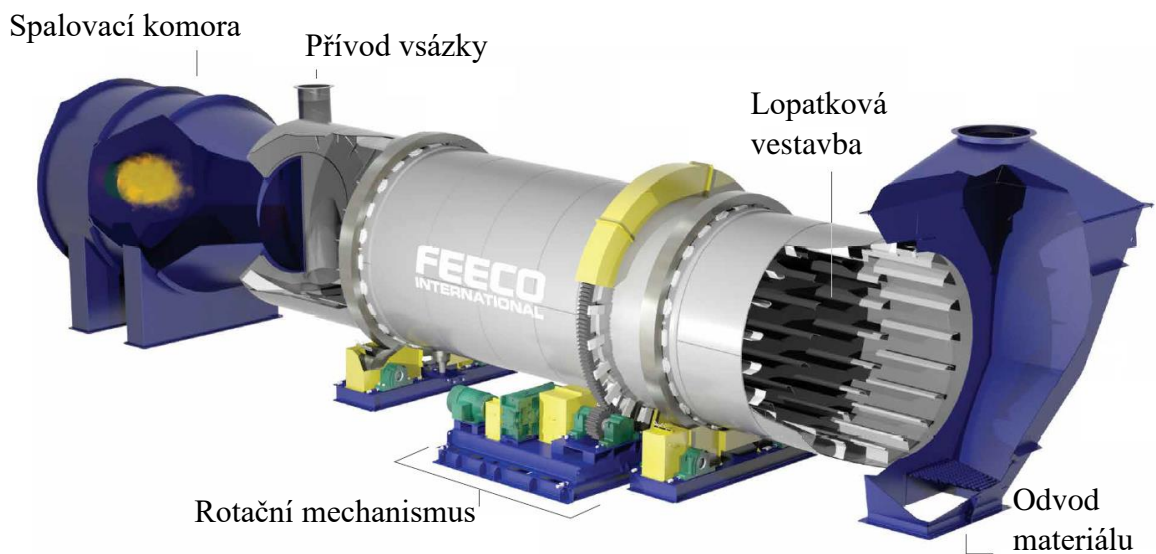
## 4 Konstrukce rotačních pecí

Konstrukce jak sušících, tak sintrovacích rotačních pecí je velmi obdobná, bude tedy popsána v jedné kapitole a na konkrétní odlišnosti bude poukázáno u jednotlivých komponent.

Hlavní částí rotačních pecí je válec neboli buben, do jehož čela je přiváděn zpracovávaný materiál. Materiál postupuje pecí za pomoci rotačního pohybu bubnu a jeho sklonu. Během tohoto pohybu je vystavován tepelnému působení horkého vzduchu a spalin, produkovanými hořákem uvnitř rotační pece. Díky tomuto tepelnému působení probíhá v peci požadovaný technologický proces. Pro zvýšení účinnosti procesu jsou rotační pece osazeny speciálními technologickými prvky, jako jsou například zvedací lišty nebo tzv. „knocking systém“.



Obr. 4.1 Schéma sintrovací rotační pece [6]



Obr. 4.2 Schéma sušící rotační pece [9]

## 4.1 Rotační válec

Největší a zároveň nejspecifičtější částí rotační pece je rotační válec, často nazýván jako rotační buben. V této části rotační pece probíhá největší část zpracovatelského procesu. Buben musí být konstruován dostatečně robustní, aby dokázal kontinuálně zpracovávat větší množství suroviny, a zároveň odolný vůči vysokým teplotám, při kterých sušící, popř. sintrovací proces probíhá. Celkový konstrukční design rotačního válce má velmi významný vliv na zpracovatelském procesu a je ve většině případů upraven pro konkrétní požadavky jednotlivých průmyslových aplikací.

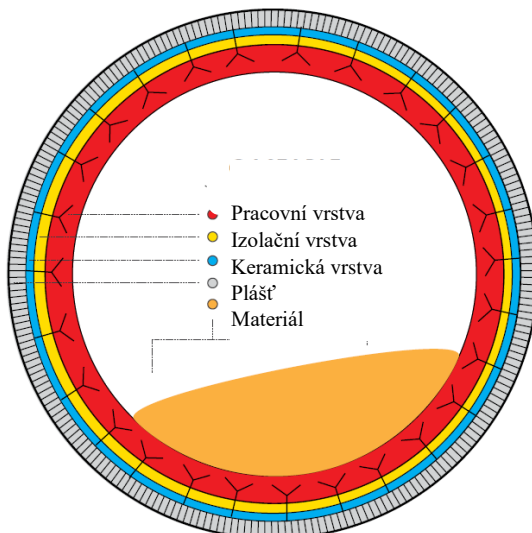
### 4.1.1 Plášť

Plášť rotačního válce může být vyroben z různých materiálů. Mezi nejčastěji používané materiály na výrobu plášťů bubnů rotačních pecí jsou uhlíkatá a nerezová ocel, Hastelloy a Inconel. Důležitou vlastností materiálu pro pláště bubnů je nízká tepelná vodivost, jelikož úniky tepla skrz stěnu bubnu snižují celkovou účinnost rotační pece. [6]

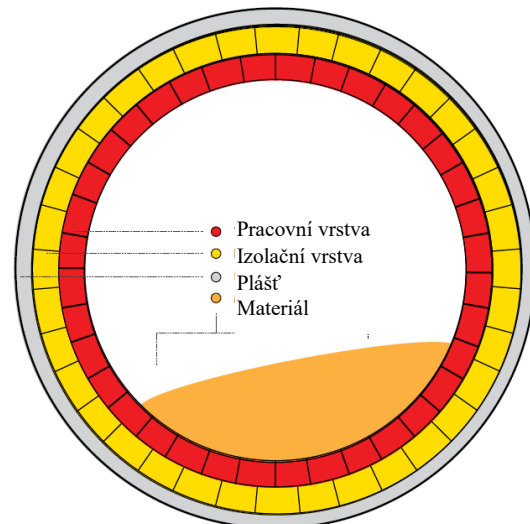
Mimo výběr vhodného materiálu je důležité také zvolit správnou tloušťku pláště. Větší tloušťka pláště zajistí menší úniky tepla, avšak navyšuje cenu a hmotnost celé rotační pece. Je tedy důležité najít optimální tloušťku splňující jak technologické, tak ekonomické faktory.

### 4.1.2 Vyzdívka (sintrovací rotační pece)

Jelikož sintrovací pece pracují s, v některých případech mnohonásobně, vyššími teplotami než sušící pece, je nezbytné plášť pece zevnitř obložit kvalitní vyzdívkou, která nejen že chrání plášť před vysokými teplotami uvnitř pece, ale zároveň zabraňuje únikům tepla. Druhů vyzdívek je celá řada. Lze je rozdělení na dvě hlavní kategorie. Slévané (obr. 4.3) a cihlové (obr. 4.4). Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody a rozhodnutí, jakou vyzdívku pro konkrétní případ využít, závisí na teplotě uvnitř bubnu a chemických a fyzikálních vlastnostech zpracovávaného materiálu. Cihlové vyzdívky jsou díky vyšší odolnosti vůči opotřebení využívány převážně pro abrazivní materiály. Jsou však finančně náročnější, jelikož mají složitý instalační proces [1] [6].



Obr. 4.3 Slévaná vyzdívka [6]



Obr. 4.4 Cihlová vyzdívka [6]

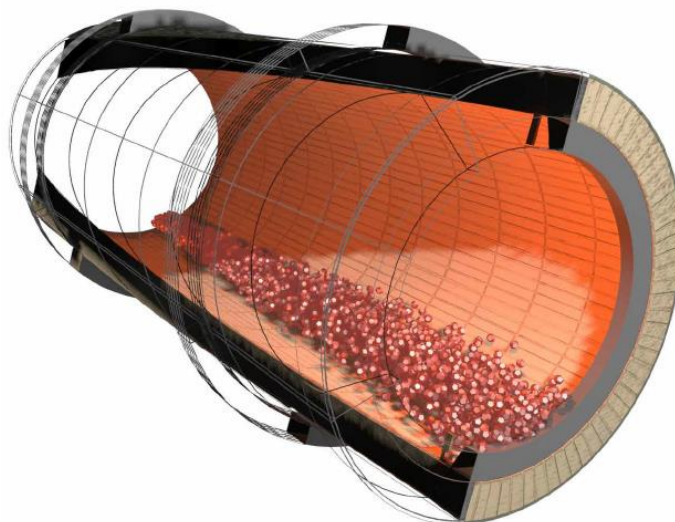
Pro dosažení co nejvyšší účinnosti pece je běžné, že se vyzdívka tvoří z více vrstev (obr. 4.3 a obr. 4.4). Vnitřní (pracovní) vrstva je v přímém kontaktu se vsázkou, a proto musí být odolná vůči vysokým teplotám a abrazi. Problém je, že tato pevná, odolná a silná vrstva má dobrou tepelnou vodivost a nezabrání přestupu tepla. Toto je důvod, proč je pod pracovní vrstvou umístěna vrstva izolační, která chrání plášť rotačního válce před poškozením vlivem vysokých vnitřních teplot a zabráňuje tepelným ztrátám. Izolační vrstva je vrstva s nižší hustotou, hmotností, a hlavně nízkou tepelnou vodivostí. Pokud jsou tepelné ztráty velkou prioritou, využívá se navíc třetí vrstva vyrobená z keramických vláken s velmi dobrými izolačními vlastnostmi. Jaké vrstvy, o jakých tloušťkách budou vyzdívku tvořit, se určuje v závislosti na konkrétních požadavcích jednotlivých průmyslových aplikací [6].

### 4.1.3 Úpravy materiálového lóže

V rotačním válci probíhá nejdůležitější technologický proces tvořen reakcí vsázky s horkým vzduchem (spalinami). Abychom dostali požadovaný produkt o co nejlepší jakosti, je nezbytné udržovat vsázkou v rotačním bubnu po požadovaný čas a zajistit co nejlepší přestup tepla do zpracovávaného materiálu. Jeden ze způsobů, jak tyto parametry ovlivnit, je přidání do bubnu speciální konstrukční doplňky.

#### Jízek

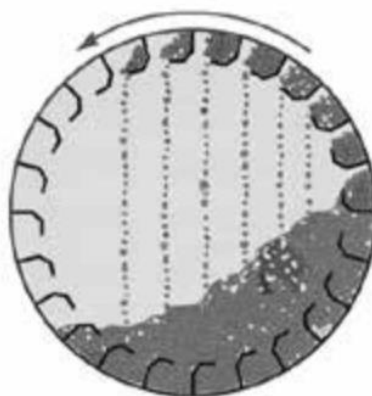
Pokud je technologií vyžadováno zvýšit zdržný čas či zvýšit množství materiálu uvnitř bubnu, pak jedno z používaných řešení jsou tzv. jízky (obr. 4.5). Ty fungují obdobně, jako přehradky na řekách. Materiál se zdržuje před hrází, čímž se prodlužuje jeho zdržný čas a zvyšuje se výška vsázky. Poté materiál „přetéká“ přes okraj jízku a opouští rotační válec. Takto umístěné jízky jsou nejefektivnější pro rotační pece s protiproudým uspořádáním (blíže vysvětleno v kapitole 5.2.2), jelikož je materiál zdržován na místě s nejvyšší teplotou vzduchu. Pokud to zpracovatelský proces vyžaduje, je možné použít větší počet jízku na různých pozicích v bubnu rotační pece. [6]



Obr. 4.5 Jízek rotačního válce [6]

### Zvedací lopatky

Zvedací lopatky se využívají převážně u sušících rotačních pecí, ale mohou být použity také při spékání za nižších teplot v sintrovacích pecích. Konstruktivních řešení lišt existuje mnoho, přičemž jejich hlavním úkolem je vynášet materiál po stěnách rotujícího válce a následně ho takzvaně sprchovat přes proudící horký vzduch (obr. 4.6). Díky tomu je zajištěn efektivnější přenos tepla mezi horkým vzduchem a vsázkou. Praktická ukázka takovýchto zvedacích lišt je zobrazena na schématu sušící pece (obr. 4.2) a v tab. 4.1 můžete vidět porovnání parametrů před a po aplikaci těchto lopatek do bubnu rotační pece. [9]



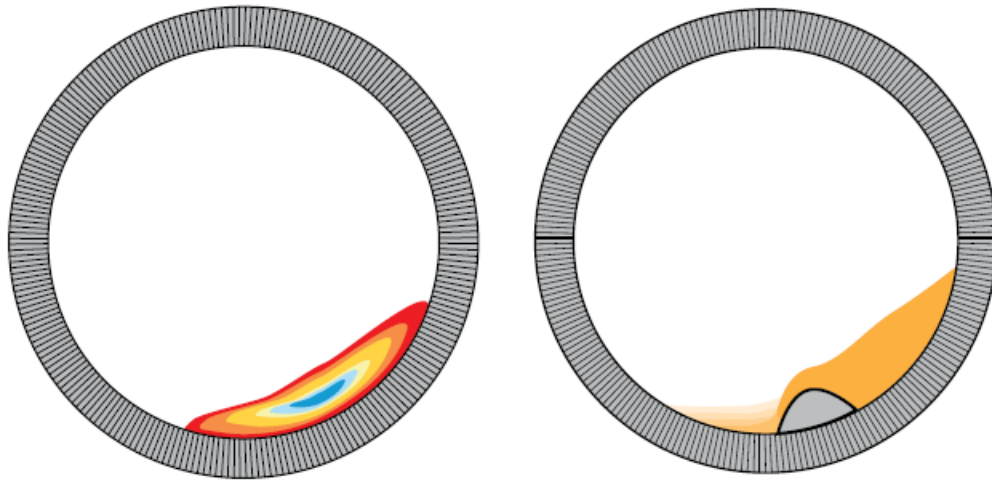
Obr. 4.6 Systém zvedacích lopatek [5]

Tab. 4.1 Změna parametrů při použití zvedacích lišt [3]

		Bez lopatek	S lopatkami	Změna (%)
Hmotnostní tok	(t/d)	650	970	47
Spotřeba tepla	(MJ/t)	2,8	2,1	-35
Teplota spalin na výstupu	(°C)	650	390	-39
Rychlost rotace	(ot/min)	1,6	2,7	70

### Obložení pece a vestavby

Struktura některých materiálů může způsobit kaskádový pohyb celého lóže napříč rotačním válcem, čemuž se snažíme zabránit například použitím obložení pecí různého tvaru nebo různými vestavbami, které narušují materiálového lóže (dále pouze obložení). Pokud vsázkou pouze „klouže“ bubnem rotační pece, nedochází k rovnoměrnému rozložení tepla lóží materiálu (obr. 4.7). Vestavba zajišťuje maximální účinnost rotační pece mícháním vsázky a vynášením tepelně neovlivněného materiálu do vnějších vrstev lóže. [6]



Obr. 4.7 Teplotní profil materiálového lóže (vlevo); Obložení materiálového lóže (vpravo) [6]

#### 4.1.1 Nosné obruče

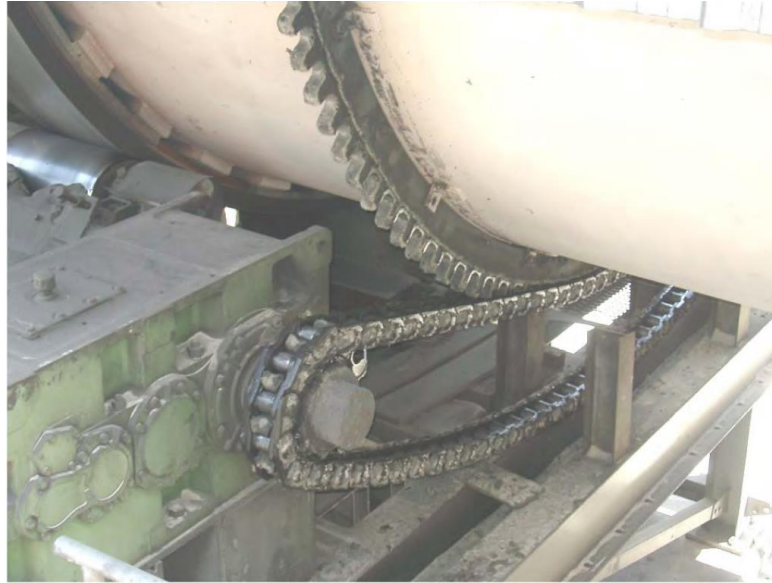
Aby byl zaručen správný pohyb rotačního válce, je nezbytné zajistit jeho adekvátní uložení a opory. Toho je docíleno využitím nosných obručí (obr. 4.2) opřených o vodící kladky (obr. 4.1) s radiálními kolečky. Nosné obruče pomáhají rozložit zátěž rotační pece. Vodící kladky zabraňují tlakem proti nosným obručím horizontálnímu pohybu rotačního válce a zajišťují plynulý a soustředný rotační pohyb bubnu. Vodící kladky obsahují podpůrná válečková ložiska, které nesou váhu rotačního válce. [6]

## 4.2 Rotační mechanismus

Rotační pohyb válce rotační pece může být zajištěn pomocí několika typů mechanismů: Řetězový, převodový, třecí a přímý. Jaký z mechanismů bude použitý, závisí převážně na požadovaném výkonu (velikosti) rotační pece. [6]

### 4.2.1 Řetězový mechanismus

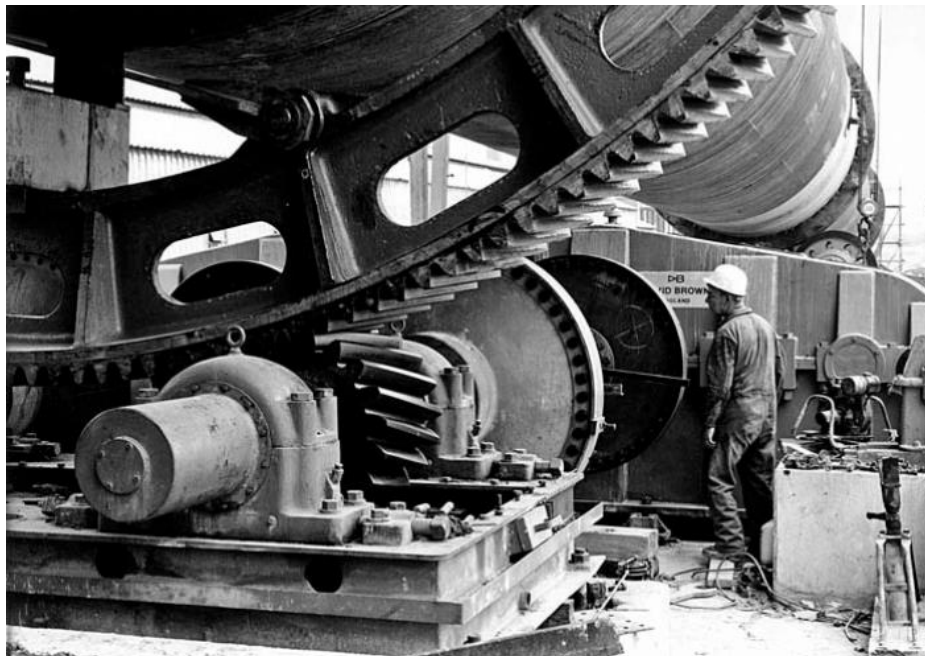
Mechanismus využívající klasického spojení řetězu a ozubeného kola (obr. 4.8). Ozubení je v jednom místě vytvořeno okolo celého obvodu rotačního válce. Ten je poháněn motorem přes převodovku pomocí řetězu. Tento mechanismus je využíván u středně velkých rotačních pecí s přenášeným výkonem do 55 kW. Výhody tohoto řešení jsou nižší finanční náklady a jednoduchý provoz. [6]



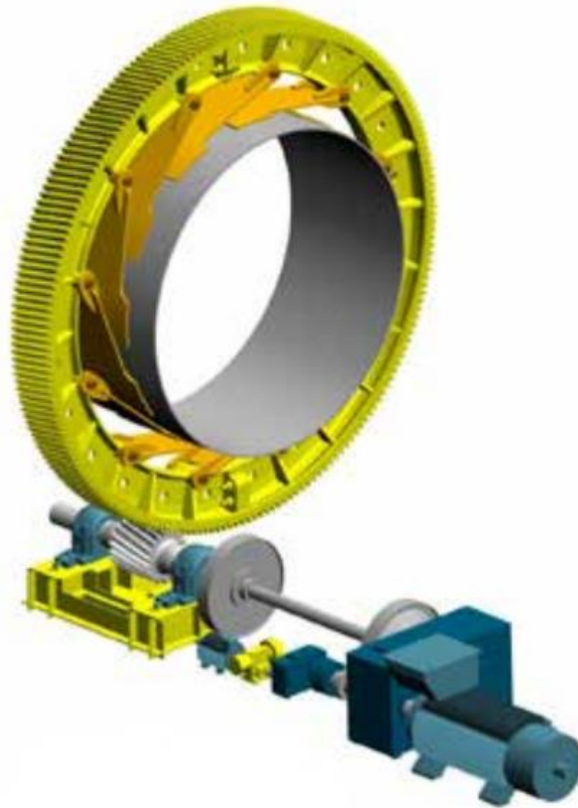
Obr. 4.8 Rotační mechanismus – řetězový [2]

#### 4.2.2 Převodový mechanismus

Převodový mechanismus (obr. 4.9 a obr. 4.10) je nejlepší řešení pro těžké rotační pece se schopností přenést výkon vyšší než 55 kW. Kolem rotačního válce je opět vytvořeno ozubení, které však není poháněno řetězem, ale druhým ozubeným kolem. Toto řešení je finančně náročnější, ale jedná se o osvědčené řešení při přenášení rotačního pohybu na velké rotační pece. [6]



Obr. 4.9 Převodový mechanismus v praxi [4]



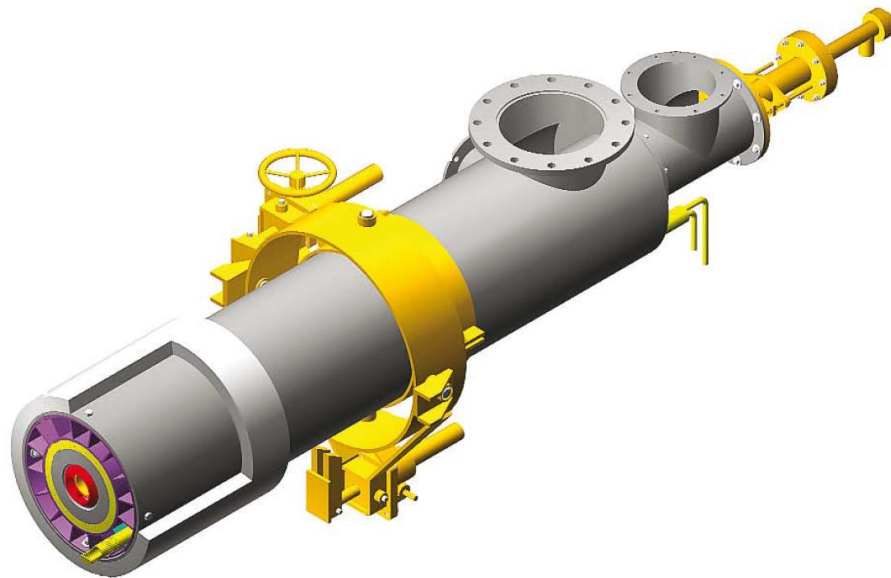
Obr. 4.10 Model převodového mechanismu [10]

### 4.2.3 Třecí mechanismus

Na rozdíl od převodového mechanismu, který je využíván u velkých rotačních pecí, je třecí mechanismus ideální řešení pro malé aplikace s nižším výkonem pohonu. Rotační pohyb bubnu je v tomto případě zajištěn třením pláště bubnu pece a radiálních koleček, na kterých je buben uložen. Tyto kolečka jsou hřídelí spojeny s motorem o požadovaném výkonu k pohánění rotační pece. Obvykle se třecí mechanismus využívá u rotačních pecí do průměrů 1,8 m [6].

### 4.3 Hořák

Hořák rotační pece dodává teplo, které je potřebné samotným procesem. Hořák může být konstruován tak, aby dokázal využívat různé druhy paliva jako například uhlí, zemní plyn, propan, naftu a další běžně využívaná paliva. Správný návrh hořáku má zásadní vliv na zajištění efektivity zpracovatelského procesu. Příklad takového hořáku, vyvíjený společností Metso Corporation, je zobrazen na obr. 4.11. Umístění hořáku může být buď přímo na jednom z čel rotačního válce (obr. 4.1) v souproutém nebo protiproutém uspořádání, nebo je umístěn odděleně ve speciální spalovací komoře (obr. 4.2). Spalovací komory se používají převážně u sušících rotačních pecí, jelikož je zde požadovaná nižší teplota v peci. V takovém případě spalovací komora funguje také jako směšovací zařízení spalin a sušícího média (obvykle vzduchu). K hoření tedy dochází odděleně od materiálu a ten se v bubnu dostává do kontaktu pouze s ohřátým proudícím médiem. Spalovací komory musejí být konstruovány tak, aby dokázaly odolávat teplotě vznikajícímu při spalovací reakci. [3]



Obr. 4.11 Hořák (spol. Metso) [11]

Spalovací reakce (4.1) je přeměna spalovaného paliva na chemické sloučeniny reakcí daného paliva s oxidačním činidlem. Spalování je exotermická chemická reakce, což je reakce, u které dochází k postupnému uvolňování vzniklé energie do okolí. Aby došlo k zahájení reakce, je nutné dosáhnout zápalné teploty paliva, což se obvykle provádí vnějším iniciačním zážehovým zdroje. Mezi tyto zdroje patří zapalovací hořáky, vysokonapěťové zapalovací zařízení apod. Oxidačním činidlem je nejčastěji vzduch, ale mohou se využívat také směsi s velkým obsahem kyslíku nebo čistý kyslík. [3]



Efektivnost spalování a množství uvolňovaného tepla může být posuzována dle intenzity, zářivosti a tvaru plamene. Ze spalovací reakce (4.1) vyplývá, že množství produkovaných spalin je dána nadstechiometrickým přebytkem poměru paliva a okysličovadla. [3]

### 4.3.1 Paliva

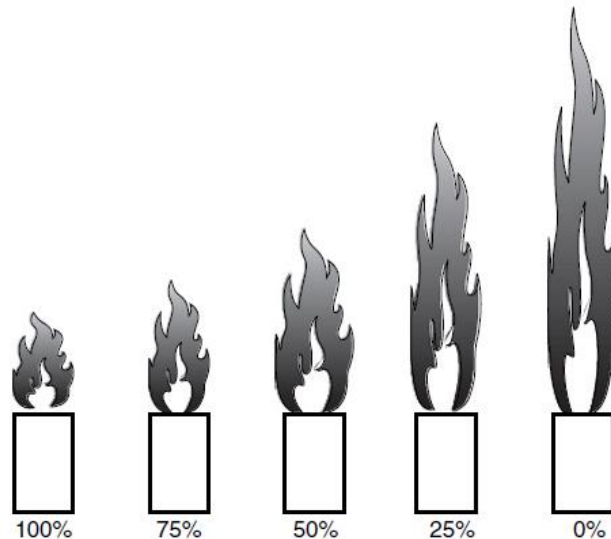
V rotačních pecích se používají různé druhy paliv, dle ekonomických a technických požadavků. Jsou to paliva v plynném, kapalném či pevném skupenství. Rotační pece mohou spalovat například zemní plyn, topné oleje, uhlí, koks nebo kombinace těchto zmíněných paliv. Nejčastěji se jako primární palivo v rotačních pecích spaluje uhlí či ropný koks vznikající při krakování v ropných rafinériích. Další možností je využití spalitelných odpadů. Ty zahrnují například použité pneumatiky, hadry kontaminované mastnotou, či kapalné hořlavé materiály. Pouze ve Spojených státech amerických ročně vznikne přes 280 miliónů ojetých pneumatik a více než třetina z nich se spálí v rotačních pecích při výrobě cementu. Zařízení spalující v rotačních pecích jako doplňkové palivo pneumatiky, jsou povinny kontrolovat hodnoty vypouštěných emisí. Emisní limity jsou stanoveny platnou legislativou. Pokud hrozí překročení těchto limitů, je nutné zajistit patřičné čištění spalin. [3]

### 4.3.2 Plamen

Při posuzování plamene sledujeme jeho stabilitu, délku, tvar, barvu a také samotné místo vznícení spalovaného paliva. Tyto charakteristiky mají velký význam pro vlastní technologický proces, a proto jsou hořáky přizpůsobeny tak, aby mohly měnit tvar a délku plamene dle aktuálních požadavků. [1]

Charakteristiky plamene jsou ovlivňovány různými faktory. Dělíme je na dvě skupiny podle toho, zda je může operátor rotační pece měnit či ne. V první skupině faktorů, nad kterými má operátor kontrolu, je například kvalita paliva, teplota paliva, teplota vzduchu, hmotnostní tok paliva, pozice hořáku, a další. Druhá skupina zahrnuje například průměr vzduchového kanálu přivádějící vzduch do hořáku, průměr rotačního válce, design hořáku a výhřevnost paliva. Tyto charakteristiky nemůže operátor měnit, jelikož vychází z konstrukčního návrhu rotační pece či vlastností používaných materiálů. [1]

Jedna z proměnných, která má zásadní vliv na charakteristiku plamene, je množství spalovacího vzduchu přiváděné do hořáku spolu se spalovaným palivem. Na obr. 4.12 je tato závislost vyobrazena. První případ zobrazuje tvar plamene v případě, že vstupní směs paliva obsahuje 100 % potřebného kyslíku k proběhnutí spalovací reakce. Plamen je v tomto případě krátký, ostrý a je zbarven bledě modře. Toto je způsobeno tím, že všechny potřebný kyslík je přiveden hořákem. Další případy mají menší podíl kyslíku ve vstupní směsi a to 75 %, 50 % a 25 %. V těchto případech musí spalovací reakce čerpat chybějící kyslík ze vzduchu ve spalovací komoře difuzí okolního kyslíku, což vede k prodloužení plamene a také se začne měnit zbarvení plamene. Bledě modrý kužel uvnitř plamene se zmenšuje a začíná převažovat vnější žluté zbarvení plamene. Poslední zobrazený příklad je ukázkou plamene v případě, že vstupní proud je pouze palivo bez přidaného kyslíku. Takovýto plamen je velmi dlouhý a celý žlutě zbarvený. Nutno dodat, že je-li ve všech případech spáleno stejné množství molekul paliva, pak je uvolněno také stejné množství energie. Zásadní rozdíl je ale v distribuci tepla podél délky rotačního válce či spalovací komory. V praxi do spalování vstupuje, vlivem netěsností konstrukce, vyšší množství vzduchu, než je předpokládáno teoreticky. [3]



Obr. 4.12 Vliv oksyločení na tvar plamene [3]

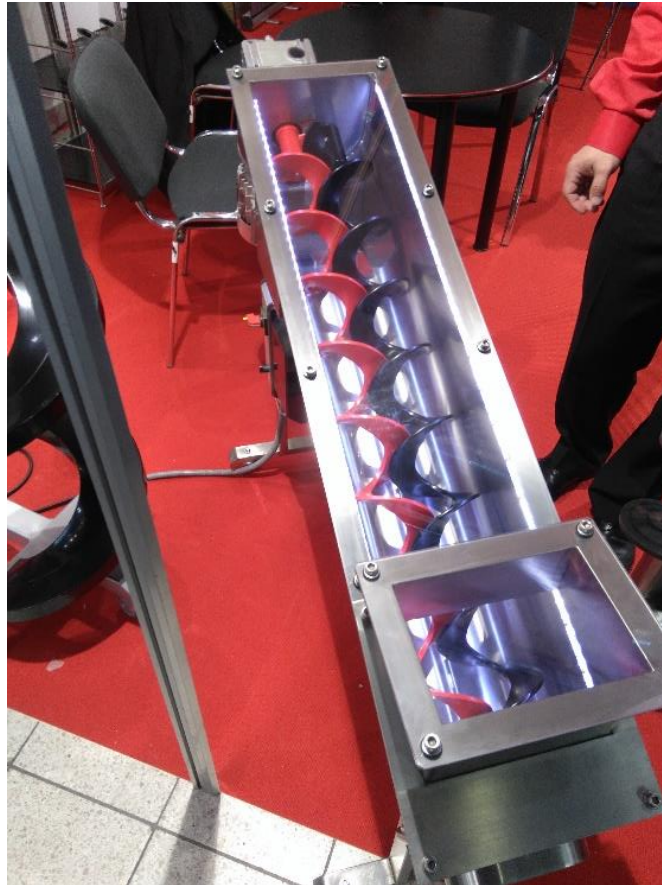
## 4.4 Vstupy a výstupy

### 4.4.1 Přívod vsázky

Vsázka je do rotační pece nejčastěji přepravována pomocí šnekových dopravníků. Toto se může ovšem velmi lišit dle konkrétního materiálu, který je jako vsázka využíván. Dopravník by měl být robustní a měl by zabraňovat aglomerování materiálu, což by v opačném případě vedlo k jeho ucpávání a tím přerušení kontinuálního dávkování. Na obr. 4.13 je vidět ukázka moderního šnekového dopravníku na viskózní látku společnosti RATAJ a.s., který byl vystavován v Brně na Mezinárodním strojírenském veletrhu v roce 2017.

Alternativou ke šnekovým dopravníkům mohou být jiné mechanické dopravníky, jako například pásové, článkové, hrabicové dopravníky či redlery. [12]

Pokud rotační pec není určena k pravidelnému zpracování velkého množství vsázky, může být vsázka do rotační pece přiváděna manuálně, bez potřeby speciálních dopravníků.



Obr. 4.13 Dopravník spol. RATAJ a. s. (Foto autor)

#### 4.4.2 Odvod produktu

Po dokončení technologického procesu neboli poté, co materiál projde celou délkou rotačního válce, je výsledný pevný produkt odveden z rotační pece. Jak se dále s tímto produktem nakládá, závisí na konkrétní aplikaci. Pro ilustraci jsou dále ukázány dva velmi odlišné příklady, jejichž produktem je buď popel, nebo dále zpracovávaný materiál.

##### Spalování kalů

Při spalování odpadů vzniká popel. Menší množství popele je unášeno spalinami a odstraněno v systému čištění spalin, avšak větší množství popele se nachází na dně rotačního válce. Při dosažení konce rotačního válce je popel pomocí gravitační síly přesunut do uzavřených kontejnerů (obr. 4.14) a následně je zavezen na skládku. U menších pecí může být odstraňování popele zajištěno pouze manuálně pomocí menší nádoby, jak je vyobrazeno na (obr. 4.15). Naopak u velmi velkých zařízeních s velkou produkcí popelovin se popel pomocí dopravníků přesouvá do uskladňovacích sil (obr. 4.16), odkud je poté posupně odvážen na skládku. [2]



Obr. 4.14 Kontejnery na popel [2]



Obr. 4.15 Nádoba na popel

Při nakládání s popelem a podobnými residui se objevuje jeden velký problém v podobě vysoké prašnosti. Částice popele jsou velmi lehké a jsou snadno unášeny prouděním vzduchu. Proto je tendence přesunovat tyto prašné částice v uzavřených prostorách (uzavřené dopravníky, potrubí) nebo je ihned po opuštění rotační pece vlhčit vodou (obr. 4.17), čímž se na jednu stranu vyřeší problém prašnosti, ale na stranu druhou vznikají problémy jiné, jako například vyšší hmotnost dopravovaného residua. [2]



Obr. 4.16 Zařízení s uskladňovacími sily [2]

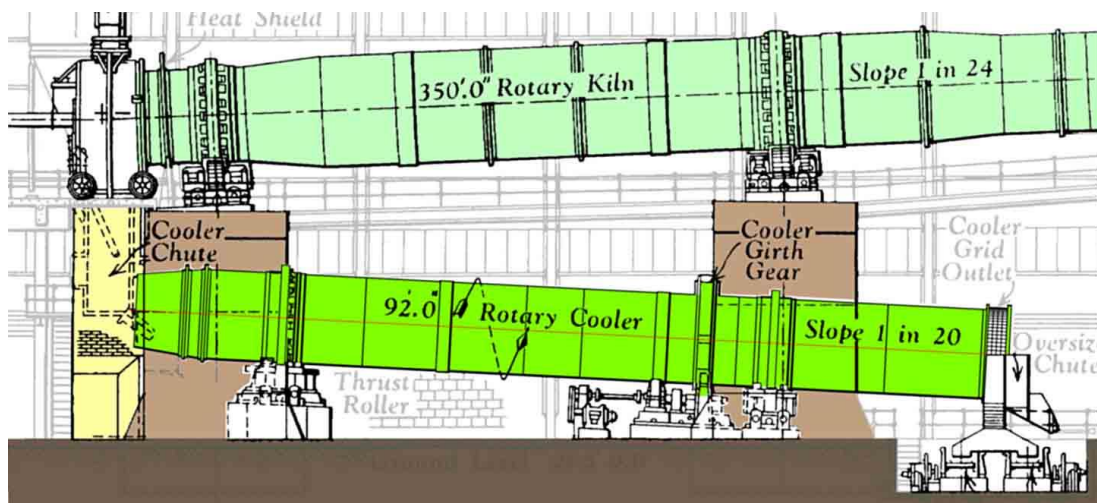


Obr. 4.17 Dopravník na vlhký popel [2]

## Výroba cementu

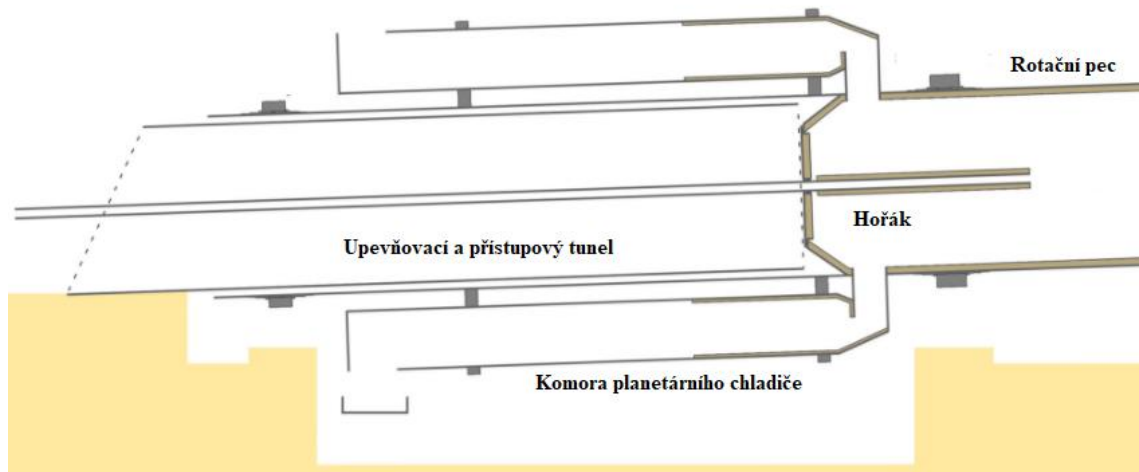
Základem výroby cementu je spékání slínku. Slínek vzniká jako produkt procesu probíhajícího v rotační peci. Cement vzniká mletím ochlazeného slínku spolu s nutnými příměsemi. Aby mohl být slínek správně rozemlet, nesmí být jeho teplota vyšší než 100 °C, avšak při výstupu z rotační pece je teplota slínku mnohdy vyšší než 1200 °C, proto musí být slínek v první řadě ochlazen. Existuje mnoho různých způsobů, jakými se dá slínek ochlazovat, avšak historicky nejvyužívanější jsou tři. Rotační chladič, využíván převážně v první polovině 20. století, planetární chladič, která byl nejpoužívanější mezi léty 1920 až 1970, a od druhé poloviny 20. století aplikovaný roštový chladič. Mimo ochlazování slínku na požadovanou teplotu mletí také chladiče zabraňují zbytečným ztrátám tepelné energie, kterou by se sebou slínek vystupující z pece odvedl. [4]

Rotační chladič (obr. 4.18) se konstrukčně velmi podobá rotační peci. Je umístěn přímo pod ní a chlazený materiál do ní gravitačním působením padá přímo z rotační pece. Chladicí vzduch odebírá teplo ze slínku a mohl být poté využíván jako přehřátý vzduch v rotační peci, nebo k jiným tepelným účelům. [4]



Obr. 4.18 Rotační chladič [4]

Avšak rotační chladiče měly zjevné nedostatky. Konstrukce rotačních chladičů byla velmi složitá. Aby docházelo k samovolnému spádu materiálu z rotační pece do rotačního chladiče, musela být rotační pec postavena vysoko na masivních, drahých oporách. Pokud měl být přehřátý vzduch z rotačního chladiče dopravován do rotační pece, muselo být zajištěno dostatečné sání a velmi kvalitní těsnění celého zařízení. A do třetice, takto složitá konstrukce obsahovala velké riziko poruchy mechanických částí a velmi složitý servis zařízení. Proto byla velká motivace vyvinout nový, lepší způsob, jak slínek chladit, a to dalo za vznik planetárním chladičům (obr. 4.19). Tyto chladiče jsou konstrukčně značně zjednodušené. Jedná se o skupinu chladících válců, které jsou upevněny přímo po obvodu rotační pece a rotují spolu s jejím rotačním válcem. Když materiál dosáhne konce rotační pece, pokračuje v pohybu do planetárního chladiče, kde je ochlazen na požadovanou teplotu a padá na dopravník, který jej dopraví do mlýna. Chladicí vzduch je ohříván a poté proudí přímo do rotační pece. Praktická aplikace planetárního chladiče je vyobrazena na obr. 4.20. [4]

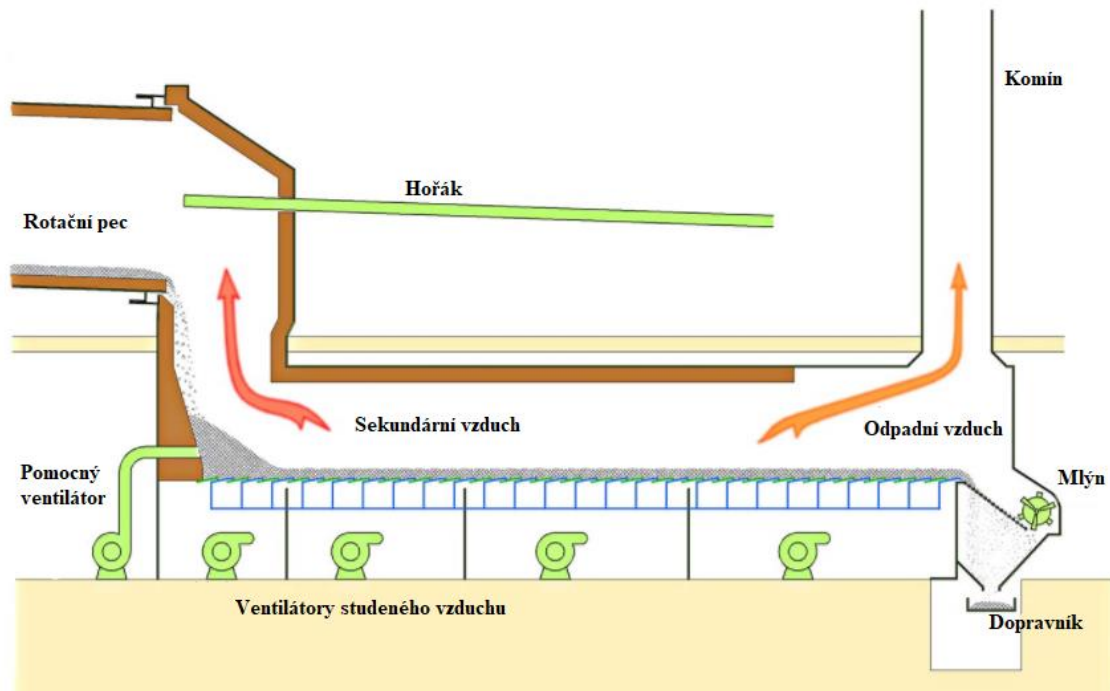


Obr. 4.19 Planetární chladič [4]



Obr. 4.20 Planetární chladič v praxi [4]

Třetím typem chladiče je chladič roštový. Ventilátory dopravují studený vzduch přes děrovaný rošt, po kterém se pohybuje slínek, prochází jím a odebírá jeho teplo. Existují různé mechanismy, pomocí kterých je slínek sunut po roštu, například na schématu vyobrazeném na obr. 4.21 je pohybu slínku docíleno pomocí kmitavého pohybu roštu. Na rozdíl od předcházejících dvou chladičů, které jsou výměníky tepla s protiproudým tokem, je roštový chladič výměník tepla s tokem křížovým. Tento mechanismus má menší účinnost, avšak nabízí jisté výhody. Zatímco v předcházejících případech byl slínek, který čerstvě vstupoval do chladiče, chlazen již ohřátým vzduchem, v tomto případě je chlazen okamžitě vzduchem studeným, což vede k prudkému ochlazení slínku a tím ke zlepšení jeho kvality. [4]



Obr. 4.21 Roštový chladič [4]

#### 4.4.3 Odvod spalin

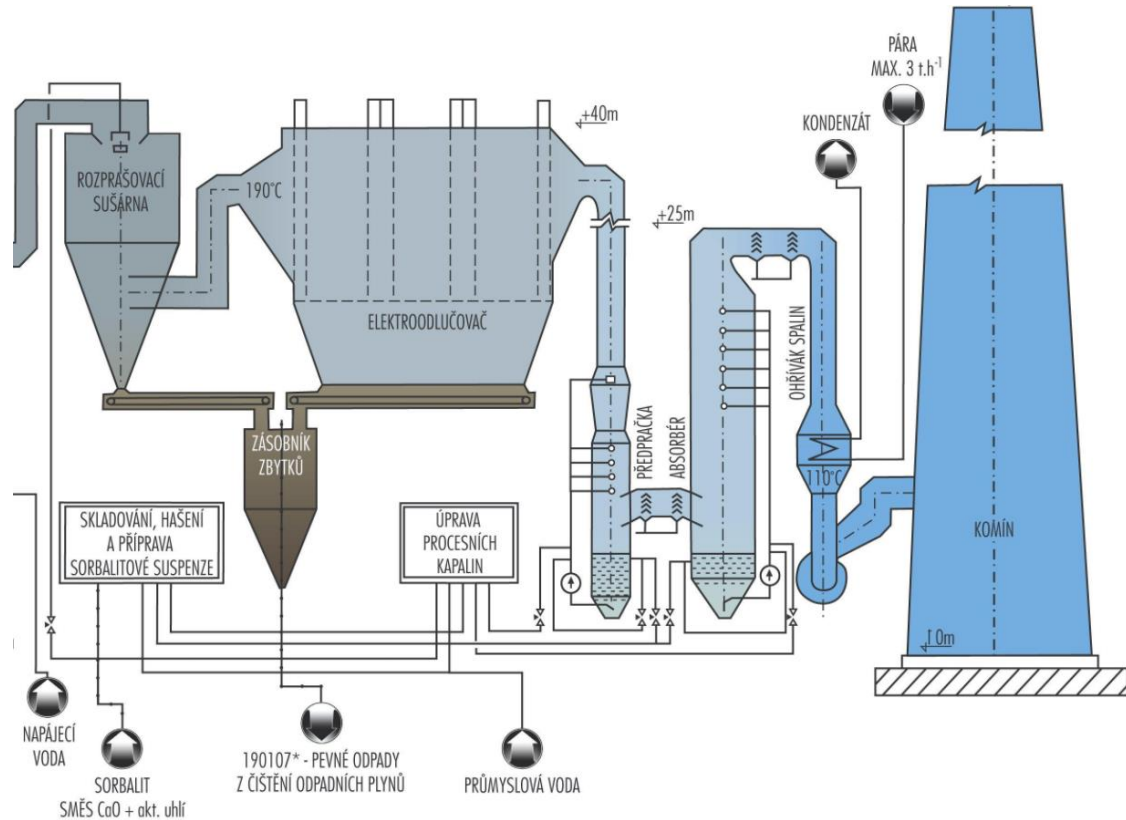
Spaliny jsou z rotační pece odváděny do systému čištění spalin, kde dochází k jejich čištění neboli odstraňování nežádoucích emisí, předtím, než jsou vypuštěny komínem do ovzduší. Emisní limity, kterými se musí zařízení řídit, jsou dány legislativou a jejich dodržování je pro společnost provozující takovéto zařízení závazné dle Zákona o ochraně ovzduší (Zákon č. 201/2012 Sb.).

Mezi znečišťující látky obsažené ve spalinách se uvažují například tuhé znečišťující látky (TZL), organická látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem organického uhlíku (TOC), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>), dioxiny (PCDD) a furany (PCDF).

Čištění spalin probíhá v několika stupních, přičemž v každém z nich dochází k postupnému odstraňování nežádoucích látek a ochlazování spalin. Existuje velké množství zařízení a technologií na čištění konkrétních znečišťujících látek. Aby bylo docíleno co nejúčinnějšího čištění, je nutné jednotlivé technologie kombinovat, čímž vzniká systém na čištění spalin. Jednotlivé systémy se od sebe mohou, díky velkému množství technologií a jejich kombinací, velmi lišit. Výběr vhodného systému závisí na mnoha faktorech, mezi něž patří například finanční náročnost, zástavbová plocha, přítomnost použitelných zařízení na místě, a další.

Příkladem takového systému na čištění spalin může být například systém, který využívá spalovna odpadů Malešice (viz obr. 4.22). Prvním čistícím zařízením je rozprašovací sušárna, kde vstupují spaliny při teplotě okolo 300 °C. Jedná se o cyklónu, ve které dochází k oddělení pevných částic ze spalin. Zbytkové tuhé částice v podobě prachu jsou odstraněny ze spalin v elektrofiltru, kde mají spaliny teplotu asi 190 °C. Spaliny zbaveny většiny tuhých látek putují kouřovodem do pračky, kde jsou ochlazeny na 80 °C a následně promývány vápennou suspenzí. Tímto procesem dojde k odloučení

majoritního množství HCl, HF, rtuti a dalších kovů. Z pračky jsou spaliny dopravovány přes odlučovač kapek do absorbéru, který odstraní SO<sub>2</sub> a zbytky HCl, HF. Takto vyčištěné spaliny mají teplotu 65-70 °C a jsou pomocí spalínového ventilátoru odvedeny do komína, odkud odchází do ovzduší. Cestou do komína jsou však spaliny ještě ohřívány v parním trubkovém ohříváči spalin na teplotu 110 °C (nad rosný bod). [13]



Obr. 4.22 Schéma systému čištění spalin ZEVO Malešice [13]

## 4.5 Technologické doplňky

### 4.5.1 Knocking systém

Velký problém, který se může u rotačních pecí objevovat, je aglomerace materiálu, která způsobuje velké snížení účinnosti rotační pece prodloužením zdržné doby materiálu uvnitř bubny. Aglomerace se objevuje, pokud se materiál na sebe lepí, nebo ulpívá na stěnách bubny.

Jednou z možností, jak tomuto jevu zamezit, je použitím tzv. *knocking* (v překladu „klepací“) systém. Ze samotného názvu vyplývá hlavní princip této technologie, a to odbourávání nabaleného materiálu z vnitřních stěn rotačního válce pravidelným „klepáním“ do rotujícího bubny. Společnost FEECO International nabízí dvě konstrukční varianty, jak toto klepání vyvolávat. [14]

### PRINCIP KOULE V TRUBCE

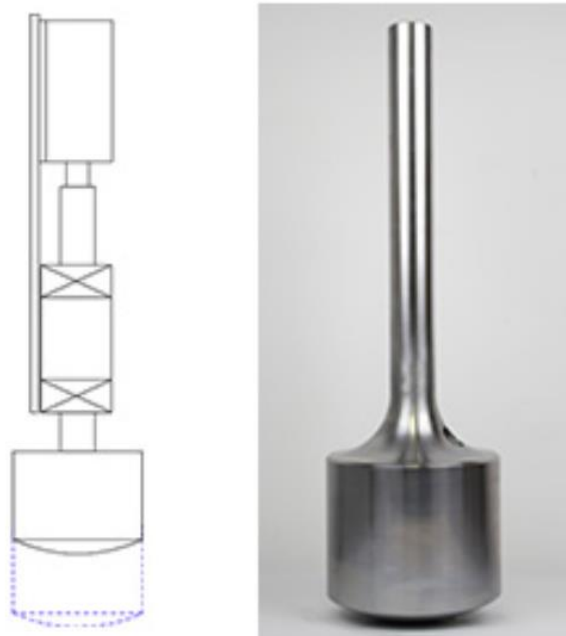
Jedná se o preferovaný *knocking* systém u rotačních pecí. Nejen, že je velmi účinný, ale obsahuje také méně pohybujících se částí než druhý z nabízených systémů, což je velká výhoda z hlediska údržby. Na rotační válec se nainstaluje speciální prstenec osazený uzavřenými komorami s koulí (obr. 4.23). Při rotaci válce se postupně koule přesouvají v komoře a v horních polohách padají a narážejí do bubnu, čímž vytváří vibrace a sklepávají materiál ze stěn bubnu. [15]



Obr. 4.23 Ball & Tube knocking systém (zleva – schéma, komora, prsten) [15]

### PRINCIP PNEUMATICKÉHO KLADIVA

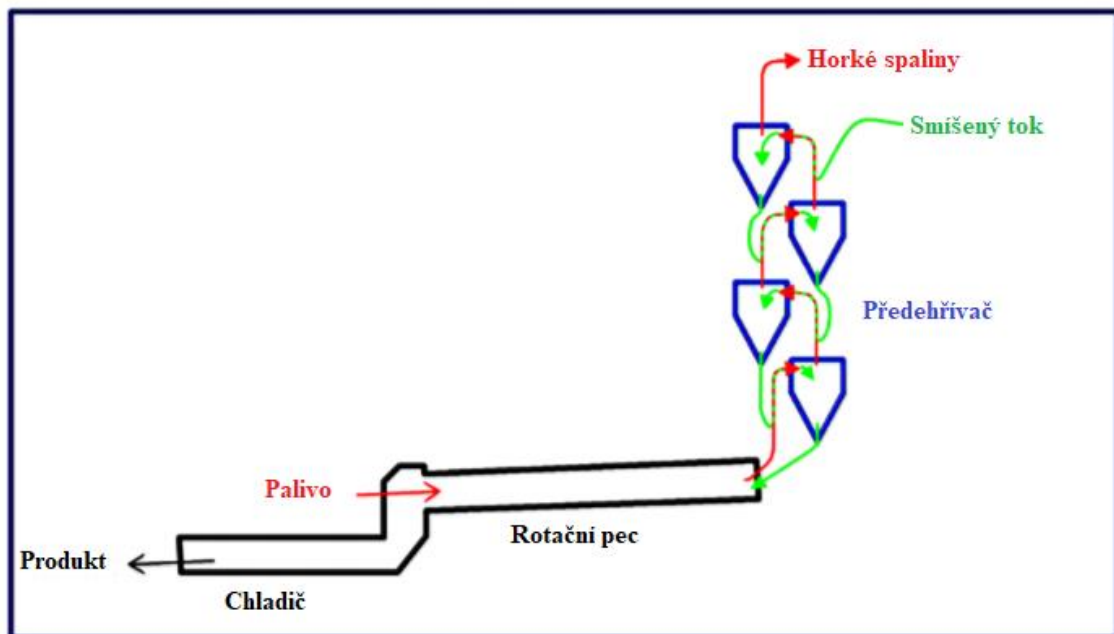
Tento systém využívá k přenosu vibrací pneumatické kladivo, které je nainstalováno nad rotační válec a odbourává nabalený materiál úderem do nárazové plochy rotujícího bubnu. Velkou výhodou této technologie je možnost jednoduše měnit velikost síly, kterou bude kladivo na buben vyvíjet, frekvenci úderů či možnost úderů kladiva kdykoli vypnout. Jedno z takových kladiv je zobrazeno na obr. 4.24. [15]



Obr. 4.24 Kladivo knocking systému (zleva – schéma, kladivo) [15]

#### 4.5.2 Předehříváče a předkalcinátory

Systém předehřevu (obr. 4.25) je jedním ze základních kamenů všech moderních systémů se sintrovací rotační pecí. Účelem tohoto systému je využít zbytkové teplo v odcházejících spalinách. Toto teplo je použito k urychlení kalcinačního procesu vsázky jejím předehřevem. Spaliny se po odchodu z pece mísí s novou vsázkou a tím předávají pevným částicím teplo. Směs spalin a předehřáté směsi je poté od sebe oddělena pomocí cyklónu. Tento proces je poté ještě několikrát zopakován. Čím více cyklónů je u předehříváku použito, tím vyšší je jeho účinnost, avšak s každým cyklónem se navyšuje tlaková ztráta v zařízení. Běžně se využívá tři až šesti sériově zapojených cyklónů (obr. 4.26). Další výhodou toho systému je schopnost odchytnout z odcházejících spalin prašné částice a navracet je zpátky do rotační pece. [4]

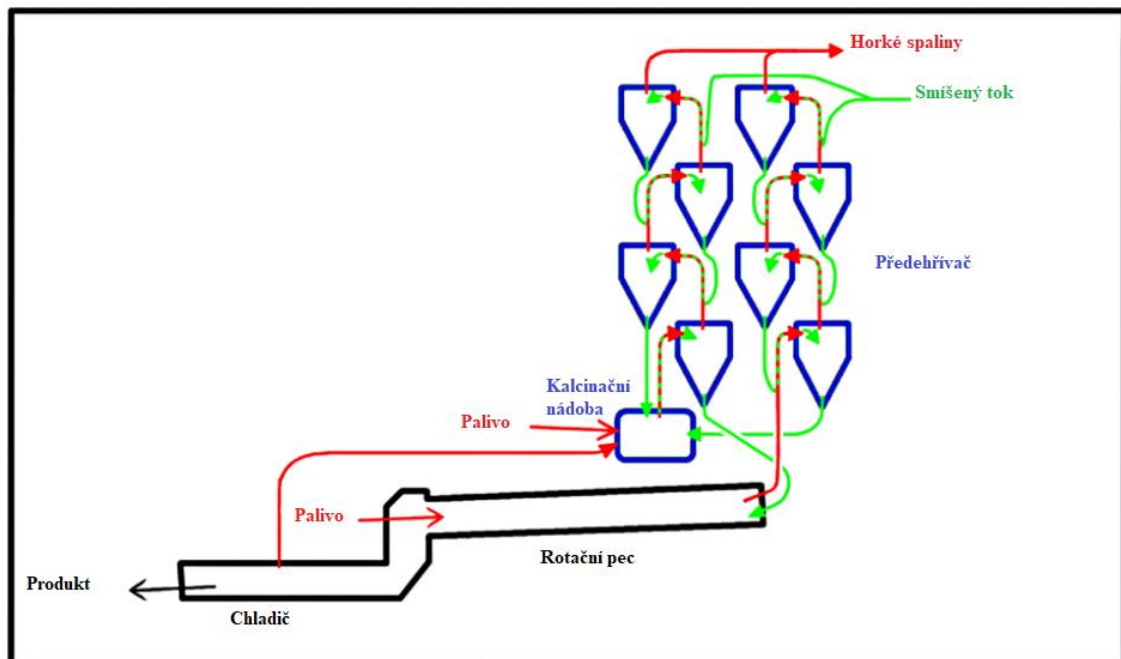


Obr. 4.25 Schéma předehříváče [4]



Obr. 4.26 Soustava cyklón [3]

Předkalcinátor (obr. 4.27) představuje poslední krok ke zlepšení účinnosti sintrovací rotační pece. Jedná se o výše zmíněný systém předehřevu vsázky doplněný o dodatečný zdroj tepla, díky kterému je docíleno ideální teploty vstupní vsázky do rotačního bubnu. [4]



Obr. 4.27 Schéma předkalcinátoru [4]

## 5 Technologické uspořádání

### 5.1 Podle způsobu ohřevu

#### 5.1.1 Přímý ohřev

Rotační pece s přímým ohřevem (obr. 5.1) jsou pece, které mají hořák umístěný přímo v bubnu rotační pece a specifické teploty ohřívání materiálu docílí přímým kontaktem s plamenem. Konstruktivní řešení takovýchto pecí je přesně popsáno v kapitole 4. Tento druh rotačních pecí je v praxi také nejčastěji využíván, jelikož dosahují vyšších účinností než rotační pece s nepřímým ohřevem. Používá se k tepelnému zpracování v mnoha odvětvích, počínaje zemědělským, těžařským či chemickým průmyslem. Tento typ ohřevu však přináší také nevýhody, mezi největší patří vyšší produkce (objem) spalin, které je nutno čistit před vypuštěním do ovzduší. Dále se tento typ nehodí ke zpracování materiálu, který nesmí přijít do kontaktu s plamenem, který se musí zpracovávat v inertním prostředí, nebo je velmi citlivý na vysoké teploty. Pro tyto případy jsou naopak vhodné rotační pece s nepřímým ohřevem. [5] [6] [9]



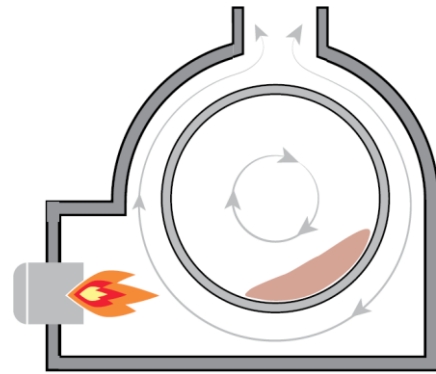
Obr. 5.1 Rotační pec s přímým vytápěním [4]

#### 5.1.2 Nepřímé ohřev

Zatímco rotační pece s přímým ohřevem nabízí maximální účinnost, rotační pece s nepřímým ohřevem umožňují zpracovávat velmi citlivé materiály a materiály, které se zpracovávají v inertním prostředí. Konstrukcí se tyto pece na první pohled liší, jak můžete vidět na obr. 5.2. Rotační válec je v tomto případě uzavřen spalovací komorou, ve které je zabudovaná série hořáků. Stěna rotačního válce je takto ohřívána z vnější strany, předává teplo přímým kontaktem zpracovávanému materiálu a zároveň ohřívá vzduch v rotačním válci. Spaliny produkované hořáky jsou poté odváděny speciálním výfukem spalin (viz obr. 5.3). [5] [6]



Obr. 5.2 Rotační pec s nepřímým ohřevem [16]



Obr. 5.3 Řez rotační pecí s nepřímým ohřevem [9]

Tato metoda má značně nižší účinnost, avšak pokud je potřeba zabránit zpracovávanému materiálu nežádoucímu kontaktu s kyslíkem nebo dusíkem, který obsahují spaliny produkované hořáky, je tento typ rotačních pecí ideální volbou. Výhodou nepřímého vytápění je také možnost přesné kontroly nad teplotou v rotačním válci po celé jeho délce. Pomocí nastavení hořáků, které jsou podél celé délky rotačního válce, lze materiál zahřívat na požadované teploty v přesně požadovaných místech, což může být zásadní pro správné technologické zpracování. Další situace, kdy je výhodné použít nepřímé vytápění rotační pece je tehdy, když je zpracováván velmi jemný a lehký materiál, který by byl v rotační peci s přímým vytápěním unášen proudem spalin do výfuku spalin. [6]

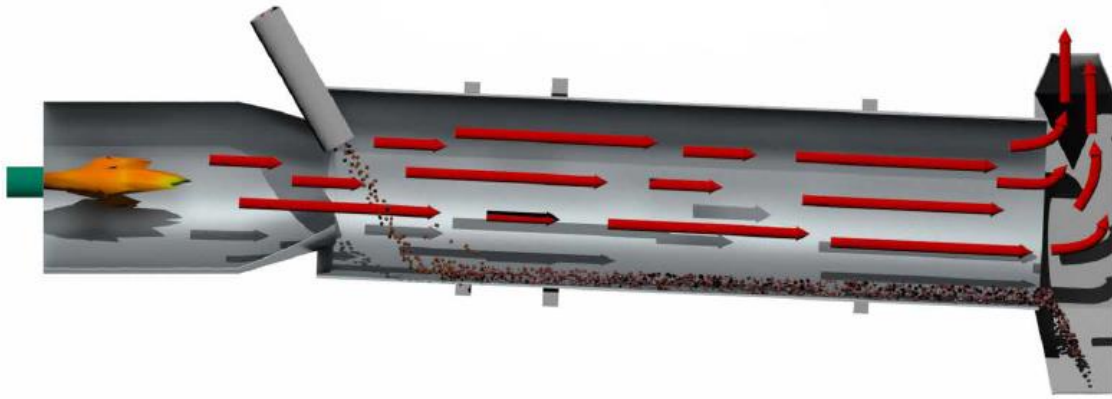
Na rozdíl od rotačních pecí s přímým ohřevem, které jsou konstruovány z uhlíkatých ocelí, nepřímé rotační pece jsou konstruovány z vysokoteplotní slitiny. To je dáno především velkým a konstantním teplotním zatížením, které musí plášť rotačního válce odolávat při přenosu tepla ze spalovací komory k zpracovávanému materiálu. [9]

## 5.2 Rozdělení pecí dle proudění vzduchu

Zvolení správné konfigurace proudění vzduchu je pro návrh rotační pece kriticky důležité. Pro klasické rotační pece připadají v úvahu dvě možnosti řešení. Souproudé a protiproudé uspořádání. Obě tyto varianty byly navrženy a vyvíjeny za účelem co největšího zefektivnění požadovaného tepelného procesu, přičemž každá z nich má své výhody a nevýhody. Volba uspořádání se zakládá na znalosti vlastností zpracovávaného materiálu a požadavků na celkový zpracovatelský proces. [3] [6]

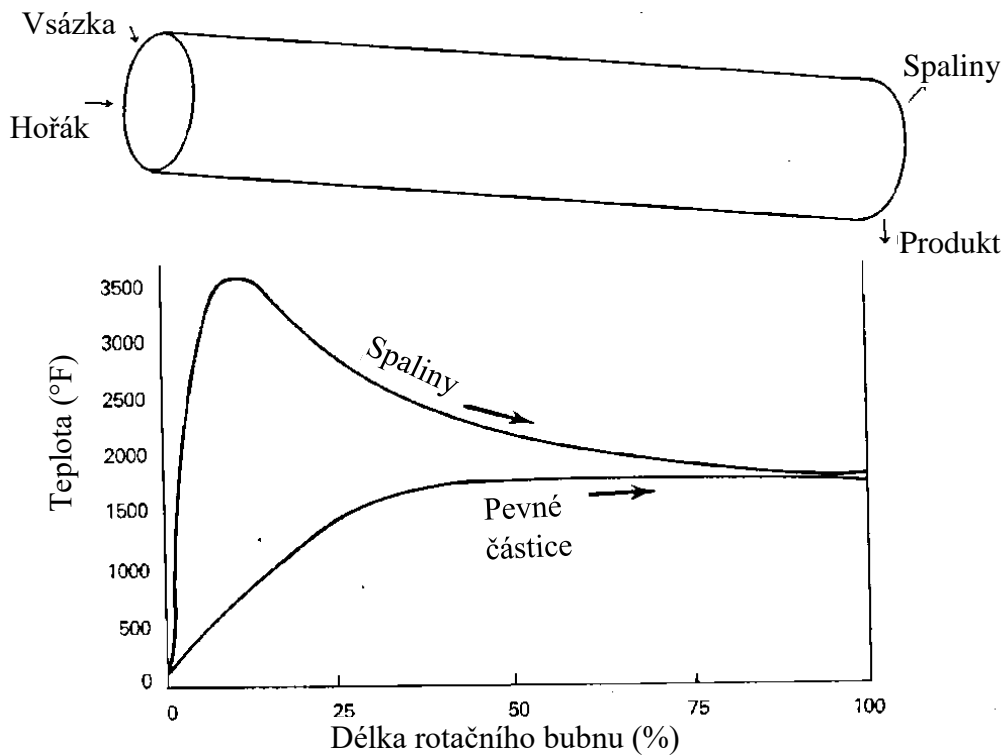
### 5.2.1 Souproudé uspořádání

Souproudé uspořádání je uspořádání, ve kterém se ohřevné médium pohybuje stejným směrem jako ohříváný materiál (viz obr. 5.4), což způsobuje okamžitý kontakt přivedené sázky s nejteplejším plynem. Toto má za následek prudký růst teploty vsázky. Závislost teploty spalin a vsázky je zobrazena v grafu na obr. 5.5. [6]



Obr. 5.4 Schéma souproutého uspořádání [9]

Toto uspořádání vede také k rychlému ochlazení horkého plynu, což vede k nižší teplotní zátěži na plášť rotačního válce než u protiproudého uspořádání. [9]

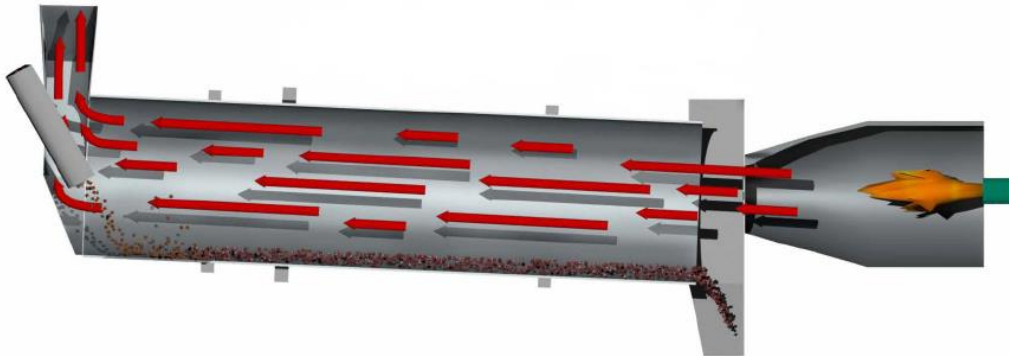


Obr. 5.5 Teplotní profil souproutého uspořádání [2]

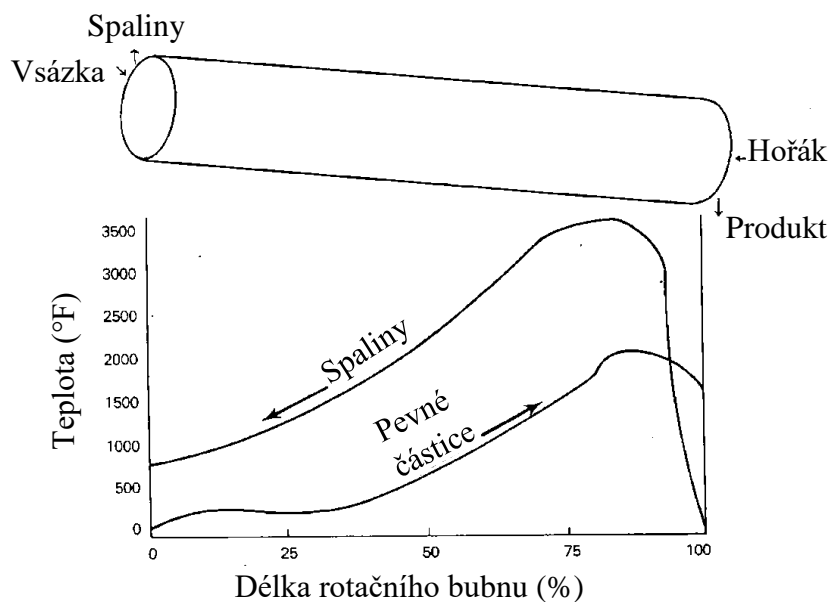
Ideální případ pro použití souproutého uspořádání je tepelná úprava materiálu, která nevyžaduje postupné zvyšování teploty. Takovým případem je například tepelná úprava látek s velkou povrchovou vlhkostí. Jedná se například o sušení skla, které vyžaduje rychlé zahřátí. Rychlé zahřátí dochází k efektivnímu sušení a předchází jeho přehřátí. Dalším případem je například spalování komunálního odpadu. Komunální odpad, skládající se jak z organických, tak anorganických látek, je přiveden přímo k hořáku, což vede k rychlému odpařování vlhkosti a spálení organických složek odpadu, který je poté odváděn formou suchého popela. [6] [9]

### 5.2.2 Protiproudé uspořádání

Na rozdíl od souproudého uspořádání, u protiproudého uspořádání (obr. 5.6) přichází čerstvá vsázka do kontaktu s nejchladnějším plynem a postupně se blíží k hořáku, tedy místu s nejteplejším ohřívacím médiem. Toto protiproudé uspořádání je obecně nejpoužívanější uspořádání rotačních pecí díky jeho vysoké účinnosti. Materiál je postupně zahříván, což umožňuje citlivější teplotní zpracování než pomocí souproudého uspořádání. Díky vyšší účinnosti, způsobené postupným ohříváním vsázky, stačí k tepelné úpravě méně tepla, což vede ke snížení spotřeby paliva hořáků, a tedy nižší provozním nákladům. Nižší požadované teploty také vedou k nižším teplotám spalin. Na obr. 5.7 je vyobrazen průběh teploty spalin a vsázky podél délky rotační pece při sušení s protiproudým uspořádáním. [6]



Obr. 5.6 Schéma protiproudého uspořádání [9]



Obr. 5.7 Teplotní profil protiproudého uspořádání [2]

Jak již bylo zmíněno, protiproudé uspořádání je vhodné na zpracovávání látek, které vyžadují postupné zahřívání k dosažení požadované fyzikální nebo chemické změny. Běžným procesem, ke kterému je toto uspořádání využíváno, je sintrování (viz kapitola 3.1.1) [6]. Další aplikací je tepelná úprava materiálů, které si udržují vysokou vnitřní vlhkost. Tyto materiály k vysušení vyžadují více tepla a delší sušící cyklus [9].

## 6 Průmyslové aplikace

Existuje celá řada průmyslových odvětví, kde je rotační pec využívána jako primární reakční jednotka, ale jak již bylo zmíněno v historickém přehledu (Kapitola 2), primárním účelem, pro který byly tyto pece vyvíjeny, bylo zpracování vápence a výroba cementu. Mimo tyto dva konkrétní případy se tyto pece využívají k tepelnému zpracování velkého množství materiálů, od minerálů přes keramické a skleněné materiály, až po plasty. [3]

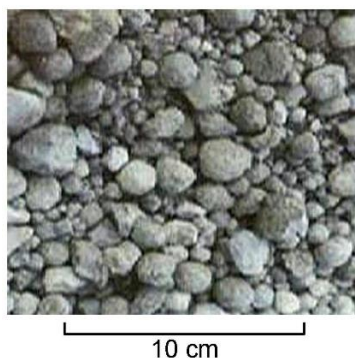
### Výroba vápna

Vápno se vyrábí z vápence, který se v zemi utváří tisíce let. Vápenec je hornina, která se skládá z vápníku, uhlíku a kyslíku. Když je tato hornina ohřívána, uvolňuje se z ní uhlík ve formě oxidu uhličitého, a zanechává za sebou oxid vápenatý neboli vápno. Tomuto procesu se říká vápencová kalcinace nebo také pálení vápna, a je to právě tento proces, ke kterému se rotační pece celosvětově hojně využívají. Rotační pece na pálení vápna se vyrábějí v různých velikostech dle požadavků zpracovatelského závodu, a to od těch menších rotačních pecí (průměr 1 m, délka 20 m) až po velké rotační pece (průměr 3 m, délka 150 m). Vápno má poté celou řadu využití, například v chemickém průmyslu, pro čištění vod, bělení budov, nebo odkyselení půdy. [3]

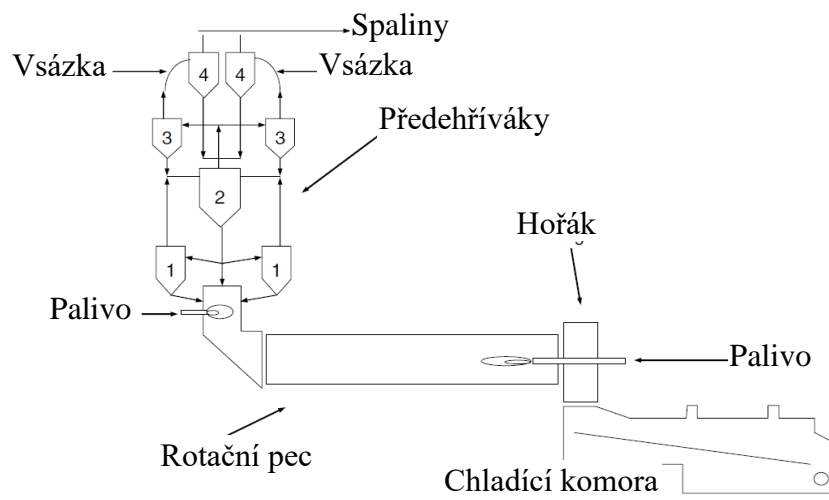
### Výroba cementu

Rotační pece jsou hnacími koňmi cementového průmyslu, a proto není divu, že existuje celá řada typů provedení rotačních pecí a jejich uspořádání, aby co nejlépe vyhovovaly jednotlivým požadavkům. Obecně je zájem o co nejefektivnější proces, který je lehce ovladatelný, má výstup v podobě kvalitního produktu a minimální zátěží pro životní prostředí. Nejčastěji se proto využívají rotační pece s protiproudým uspořádáním a předkalcinátorem (obr. 6.2). [3]

Vsázka pro vznik cementu je složená z vápence ( $\text{CaCO}_3$ ), oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hematitu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a křemičitanů ( $\text{SiO}_3$ ). Tato vsázka na začátku prochází soustavou předehříváků v předkalcinační soustavě, kde dochází k jejímu sušení, předehřevu a kalcinaci. Poté vstupuje do protiproudé rotační pece v místě s nejnižší teplotou ohřevného média a postupuje směrem k hořáku, kde teploty přesahují  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ . Postupně dochází k dekarbonizaci (teploty  $900\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) a poté slinutí ( $1450\text{ }^\circ\text{C}$  a více) směsi. Slinutá směs je poté zchlazena a tento produkt se nazývá slínek (obr. 6.1). Konečný produkt, cement, vzniká smíšením drceného slínku a technologických příměsí. [3]



Obr. 6.1 Slínek [17]



Obr. 6.2 Schéma cementářské rotační pece [3]

## 7 Přenos tepla

Aby byl proces co nejefektivnější, musíme se snažit dostat co nejvíce tepla do materiálu. V rotačních pecích se využívá všech mechanismů přenosu tepla. Kondukcce, konvekce a radiace, přičemž právě radiace je považována za dominantní mechanismus. Obecně platí, že přenos tepla se vyskytuje vždy, když je v systému zaznamenána teplotní diference. Tepelná energie bude mít v takovém případě snahu přecházet z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší tak dlouho, dokud nebude teplotní diference smazána a nenastane rovnovážný stav. Uplatňování jednotlivých mechanismů přenosů tepla v rotačních pecích je zobrazeno na obr. 7.1. [3]

### 7.1 Mechanismy přenosu tepla

#### 7.1.1 Kondukcce

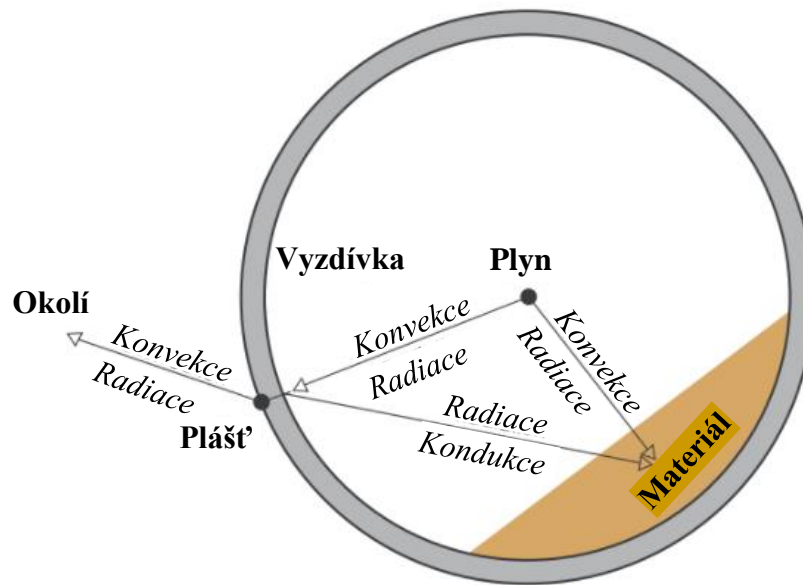
Kondukcce je mechanismus přenosu tepla díky přímému kontaktu mezi molekulami s teplotní diferencí. Kondukcce se může objevovat mezi všemi skupenstvími, avšak běžně je spojená s přenosem tepla mezi pevnými látkami. [3]

#### 7.1.2 Radiace

Radiace je mechanismus přenosu tepla ve formě elektromagnetických vln emitovaných kmitajícími elektrony na povrchu hmotného tělesa. Podobně jako jiné formy elektromagnetických vln, také tepelná radiace jednoduše prostupuje vakuem rychlostí světla. Radiace se obvykle objevuje mezi pevnými povrchy a nevyžaduje žádné kontaktní médium. Tento mechanismus je výrazný převážně při vyšších teplotách. [3]

#### 7.1.3 Konvekce

Konvekce je mechanismus přenosu tepla, který by mohl být popsán jako kondukcce v kapalinách způsobená jejím pohybem. Obvykle je spojená s přenosem tepla mezi kapalinou a pevným povrchem. [3]



Obr. 7.1 Mechanismy přenosu tepla v rotační peci [6]

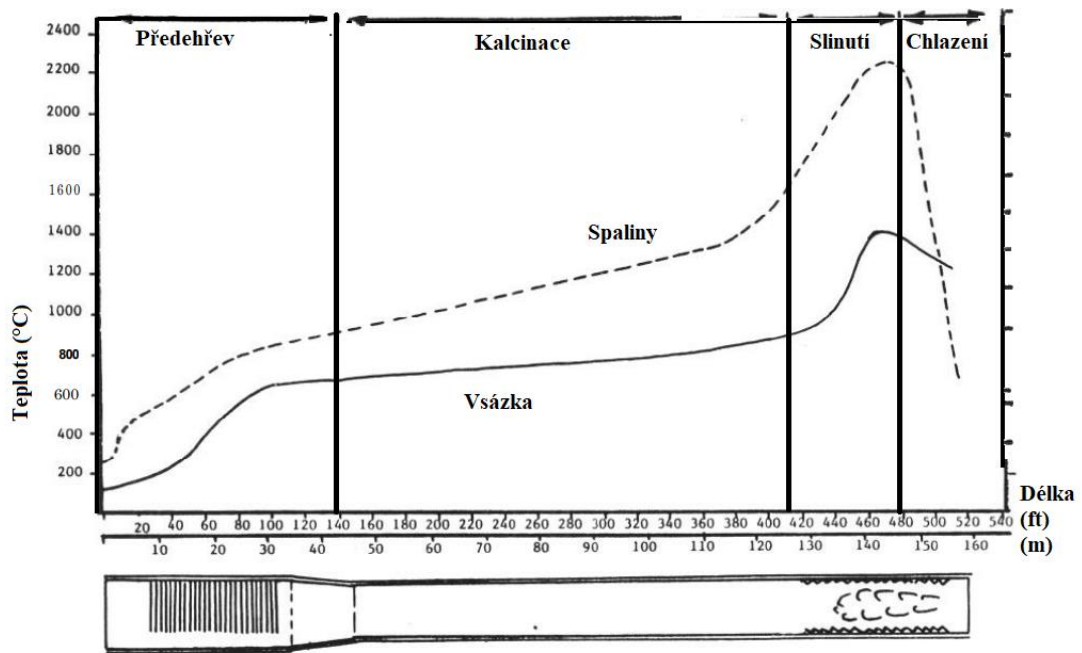
## 7.2 Teplotní profil

Na obr. 7.2-5 jsou zobrazeny teplotní profily při procesu slinutí slínku, které se od sebe liší použitou vsázkou a aplikací speciálních technologií:

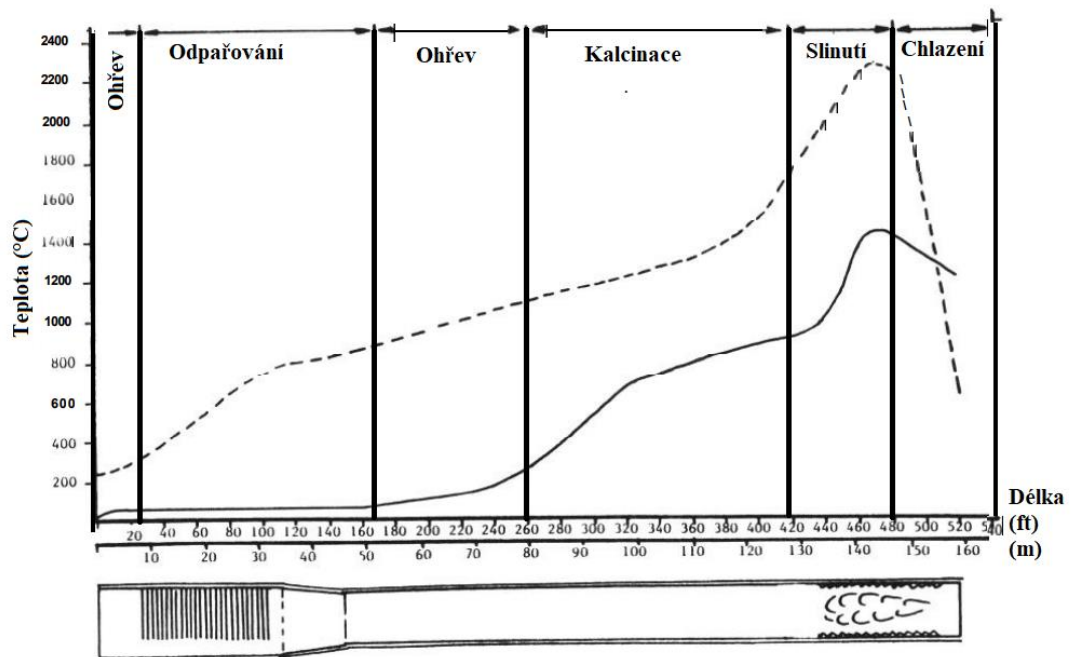
- 1) Sintrovací rotační pec se suchou vsázkou
- 2) Sintrovací rotační pec s vlhkou vsázkou
- 3) Sintrovací rotační pec se suchou vsázkou a využitím předehříváče
- Sintrovací rotační pec se suchou vsázkou a využitím předkalcinátoru

Případ 2 se od ostatních případů liší přítomností výparné zóny, kde dochází k odpařování kapalné fáze ze vstupní sázky. To má za následek zmenšení předehřívací a kalcinační zóny a zároveň velkou teplotní diferenci mezi zpracovávanou vsázkou a ohřevným médiem. [1]

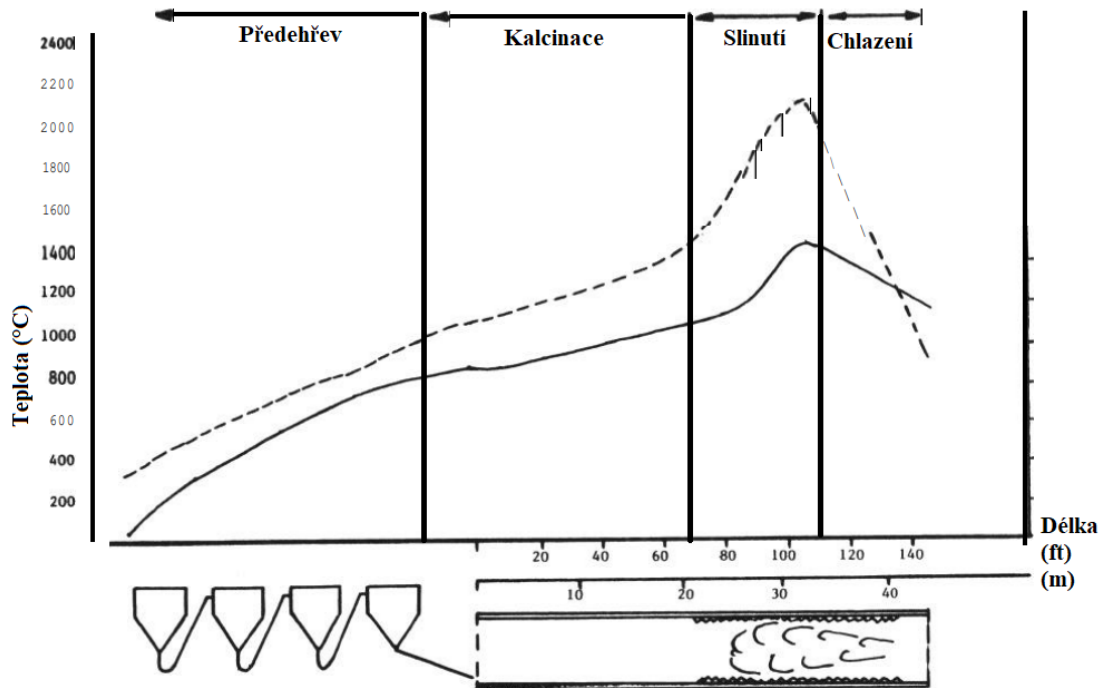
Na případech 3 a 4 je vyobrazen teplotní profil s použitím předehříváče a předkalcinátoru. Na první pohled je patrný rozdíl mezi těmito případy a případem 1. Při použití těchto systémů dochází k zefektivnění tepelného přenosu a k velmi nízké teplotní diferenci mezi vsázkou a ohřevným médiem. [1]



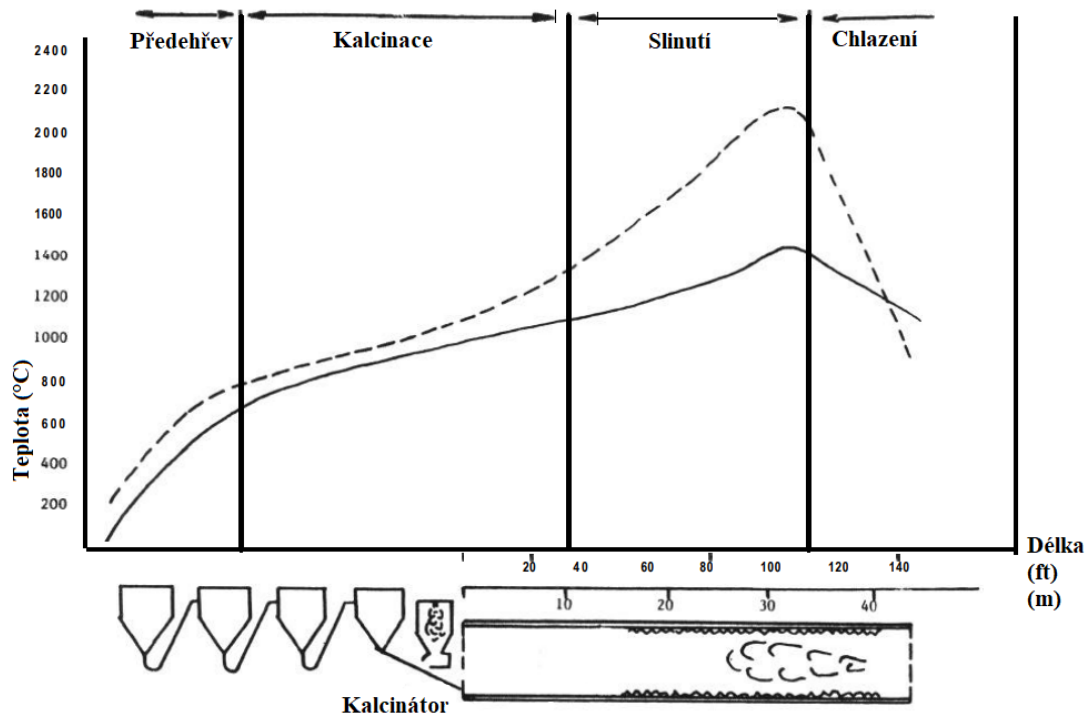
Obr. 7.2 PŘ. 1 – Teplotní profil slinutí (suchý materiál) [1]



Obr. 7.3 PŘ. 2 – Teplotní profil slinutí (vlhký materiál) [1]



Obr. 7.4 PŘ. 3 – Teplotní profil slinutí s předehřívákem (suchý materiál) [1]



Obr. 7.5 PŘ. 4 – Teplotní profil slinutí s předkalcinátorem (suchý materiál) [1]

## 8 Experimenty

### 8.1 Měřicí stanoviště

Experimentální měření bylo provedeno v laboratoři ústavu procesního inženýrství strojní fakulty VUT. Tato laboratoř disponuje sintrovací i sušící rotační pecí. Měření probíhalo na rotační sušící peci (viz obr. 8.1 a obr. 8.2) s lištovou vestavbou a možností regulace sklonu a frekvence otáčení bubnu. Pro experiment bylo zvoleno souprůdé uspořádání, avšak tato sušící pec disponuje možností přestavby také na uspořádání protiprůdé. Základní parametry pece jsou uvedeny v tab. 8.1.



Obr. 8.1 Sušící pec (pohled 1)



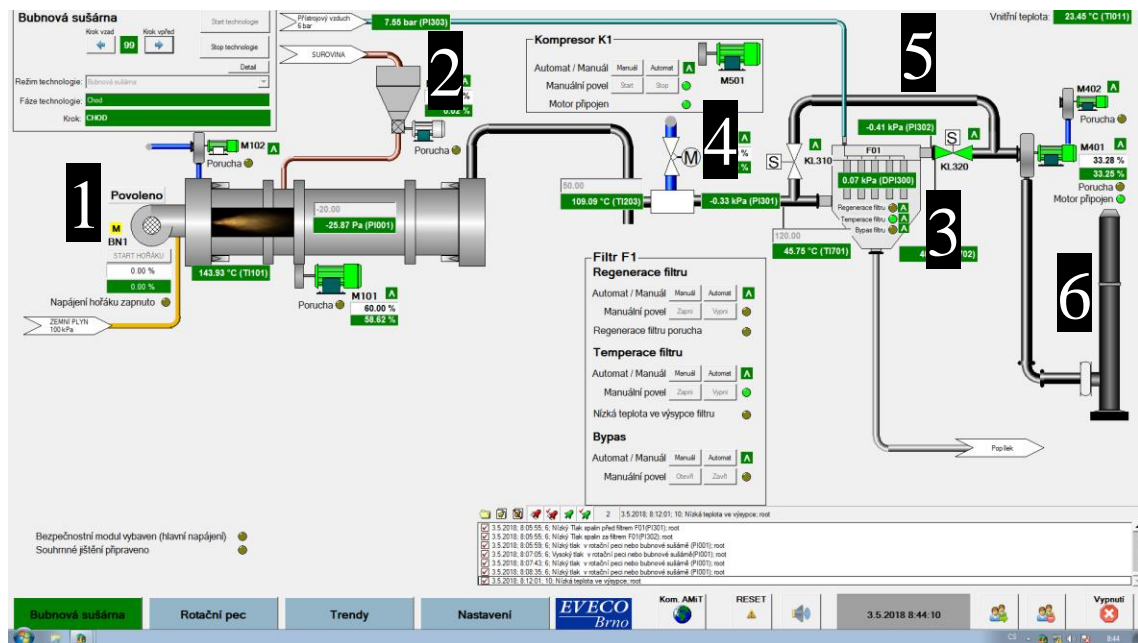
Obr. 8.2 Sušící pec (pohled 2)

Tab. 8.1 Parametry sušící pece

Parametry		Jednotky
Délka bubnu ( $L$ )	0,5	m
Vnitřní průměr bubnu ( $D$ )	3,5	m
Sušící výkon	37,5	kg/h vody
Regulovatelné otáčky bubnu ( $n$ )	0,1-6	ot/min
Regulovatelná teplota sušení	150-300	°C
Množství vstupního materiálu	1-100	kg/h

Řízení chodu technologie je zajištěno pomocí systému Control Web, který umožňuje důležité parametry procesu sušení.

Schéma celé technologie je vyobrazené na obr. 8.3, pocházejícího z uživatelského prostředí systému Control Web. Sušící vzduch je ohříván pomocí plynového hořáku (1). Vsázka je přiváděna pomocí šnekového dávkovače (2). Spaliny jsou odváděny z pece do rukávcového filtru (3). V případě vysoké teploty spalin je možnost tuto teplotu snížit přidáním vzduchu o teplotě okolí pomocí ventilu (4). By-passové potrubí (5) je zde pro případ potřeby odklonit proud spalin mimo filtr. Po průchodu spalin filtrem jsou spaliny odvedeny do komína (6) a odcházejí do ovzduší. Systém pro čištění spalin a rukávcový filtr jsou vyobrazeny na obr. 8.4 a obr. 8.5.



Obr. 8.3 Schéma technologie v softwaru Control Web



Obr. 8.4 Systém čištění spalin



Obr. 8.5 Rukávcový filtr

## 8.2 Experiment č. 1

### 8.2.1 Popis

Cílem prvního experimentu bylo zjistit zdržnou dobu materiálu v bubnu sušící rotační pece s lištovou vestavbou pro různé kombinace frekvence otáčení a sklonu bubnu pece.

Toto měření probíhalo v sušící rotační peci bez aktivního hořáku. K sušení tedy docházelo pouze pomocí proudícího vzduchu o teplotě okolí (22,5 °C) a pohybu vsázky v sušící peci. Z hlediska sušícího procesu by se nejednalo o optimální nastavení, je však dostatečné pro analýzu zdržné doby vsázky uvnitř bubnu rotační pece.

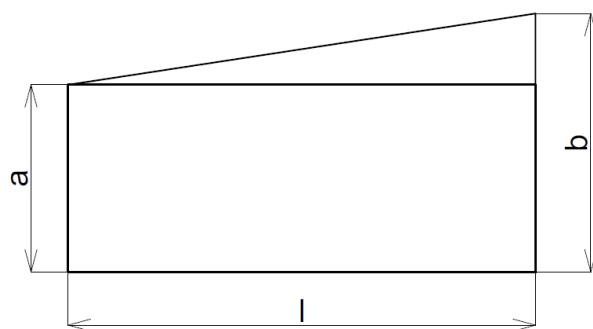
Sušící a sintrovací rotační pece jsou běžně provozovány při frekvenci otáčení rotačního válce 1-10 ot/min. [1] Tento rozsah provozních otáček nepřekračuje kritickou frekvenci otáčení, jak nazýváme stav, při kterém dojde k vyrovnání gravitačního a odstředivého zrychlení působící na materiál uvnitř bubnu. Kritická frekvence otáčení se vypočítá dle rovnice (8.1), kde  $n_{krit}$  je kritická frekvence otáčení a  $D$  je vnitřní průměr rotačního válce. [12] Frekvence otáčení, které byly zvoleny pro tento experiment jsou uvedeny v tab. 8.3, přičemž se pohybujeme v rozmezí přibližně 1 až 6 procent kritické frekvence otáčení.

$$n_{krit} = 42,5 \cdot \frac{1}{\sqrt{D}} = 60,1 \text{ ot/min} \quad (8.1)$$

Sklon rotační pece na měřicím stanovišti je nastavován změnou výšky jednoho z párů kotvicích opor (viz obr. 8.6). Úhel sklonu bubnu byl poté vypočítán dle rovnice (8.2), přičemž hodnoty  $a$ ,  $b$  a  $l$  byly získány experimentálně dle schéma vyobrazeného na obr. 8.7. Výsledky jsou zobrazeny v tab. 8.2.



Obr. 8.6 Opora rotační pece



Obr. 8.7 Schéma měření úhlu sklonu bubnu

$$\text{úhel sklonu} = \tan^{-1} \left( \frac{b - a}{l} \right) \quad (8.2)$$

Tab. 8.2 Použité úhly sklonu bubnu rotační pece

Sklon bubnu	a (cm)	b (cm)	l (cm)	Úhel sklonu (°)
Sklon č. 1	62,5	68	258	1,2
Sklon č. 2	58	68	258	2,2
Sklon č. 3	54	68	258	3,1

Pro první experiment byly zvoleny konfigurace zobrazeny v tab. 8.3. Konfigurace M1 až M9 budou použity pro zjištění závislosti zdržné doby materiálu na úhlu sklonu a frekvenci otáčení bubnu rotační pece. Konfigurace M10 a M11 se liší použitím stejného vsázkového materiálu, avšak se zvýšenou vlhkostí. Tyto konfigurace budou použity pro posouzení sušícího účinku průchodu materiálu rotační pecí bez použití ohřevu sušícího média.

Tab. 8.3 Souhrn konfigurací pro první experiment

Konfigurace	Úhel sklonu (°)	Frekvence otáčení (ot/min)	Vsázka
M1	1,2	1,5	Suchý písek
M2	1,2	3,3	Suchý písek
M3	1,2	6,1	Suchý písek
M4	2,2	6,1	Suchý písek
M5	2,2	3,3	Suchý písek
M6	2,2	1,5	Suchý písek
M7	3,1	1,5	Suchý písek
M8	3,1	3,3	Suchý písek
M9	3,1	6,1	Suchý písek
M10	1,2	1,5	Vlhký písek
M11	1,2	3,3	Vlhký písek

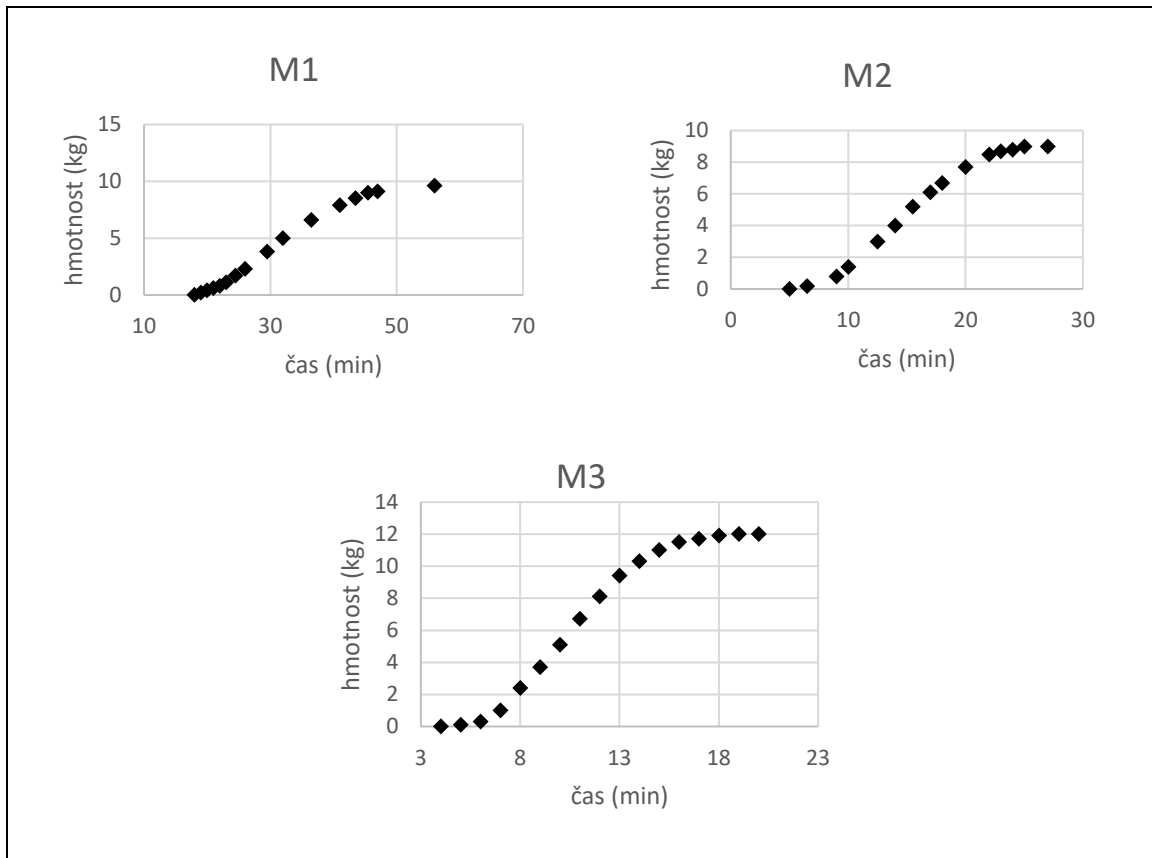
Měření probíhalo následujícím způsobem:

- 1) Rotační pec byla nastavena na požadované hodnoty (frekvence otáčení a úhel sklonu bubnu) a spuštěna
- 2) Navážené množství suroviny bylo nasypáno do zásobníku dávkovače vsázky rotační pece
- 3) Bylo spuštěno dávkování a záznam času
- 4) Byl zaznamenán čas ukončení dávkování
- 5) Pravidelně bylo váženo a zaznamenáváno množství materiálu opouštějící rotační pec
- 6) Měření bylo ukončeno poté, co se v peci nacházelo pouze zanedbatelné množství materiálu

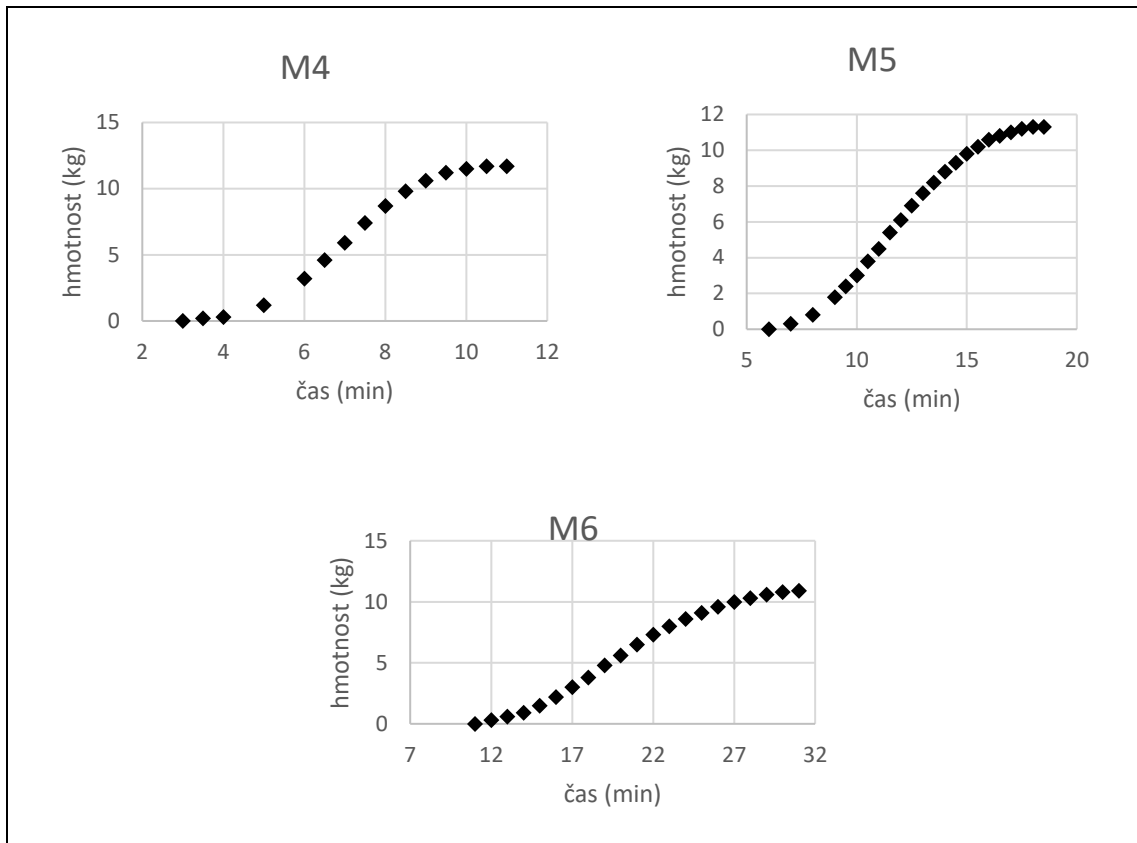
Data získána z měření byly poté vyhodnoceny v softwaru MS Excel.

### 8.2.2 Výsledky měření

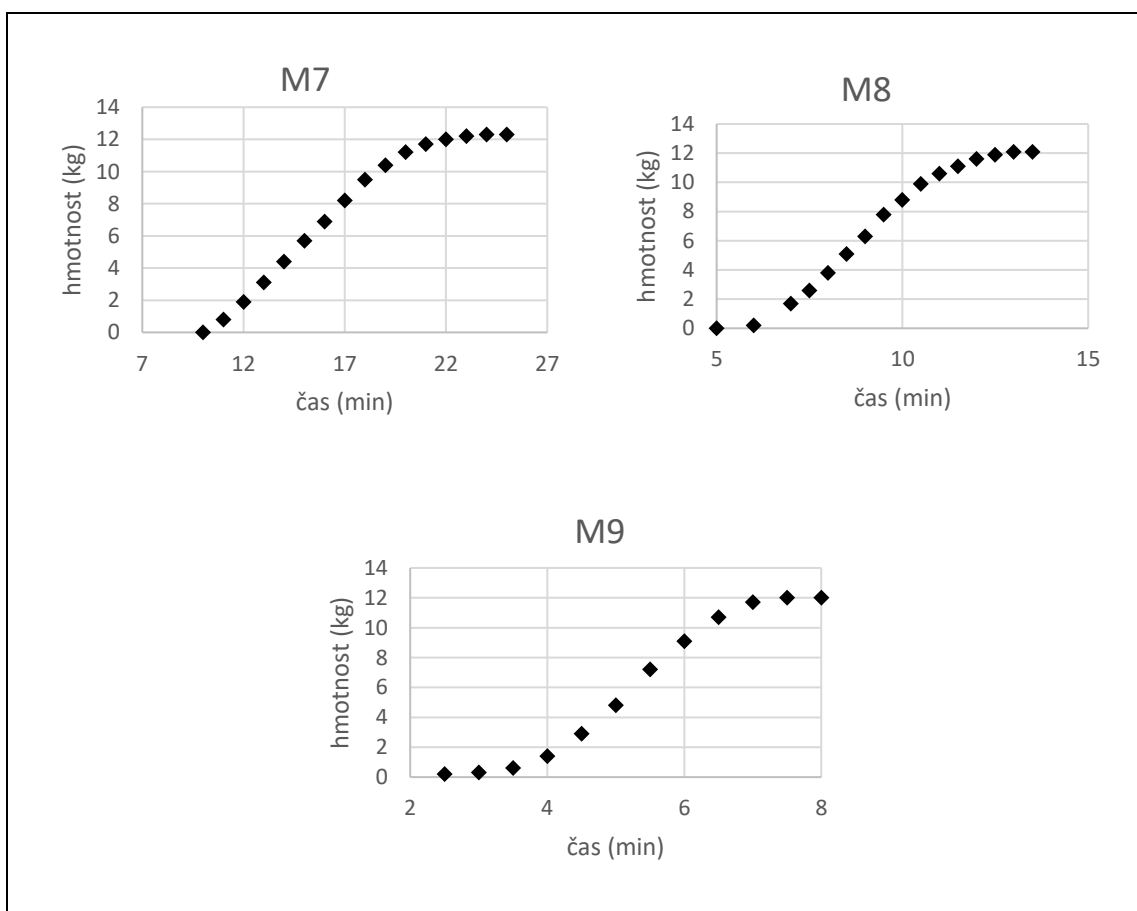
Data získána měřením jsou zde vyobrazeny v grafech, zobrazující množství materiálu, které prošlo sušící rotační pecí za určitý čas. Pro lepší orientaci byly grafy rozděleny do čtyř skupin podle úhlu sklonu rotační pece. obr. 8.8 zobrazuje konfigurace suché vsázky s úhlem sklonu  $1,2^\circ$ , obr. 8.9 suchou vsázku s úhlem sklonu  $2,2^\circ$  a obr. 8.10 suchou vsázku s úhlem sklonu  $3,1^\circ$ . Obr. 8.11 zobrazuje konfigurace s vlhkou vsázkou.



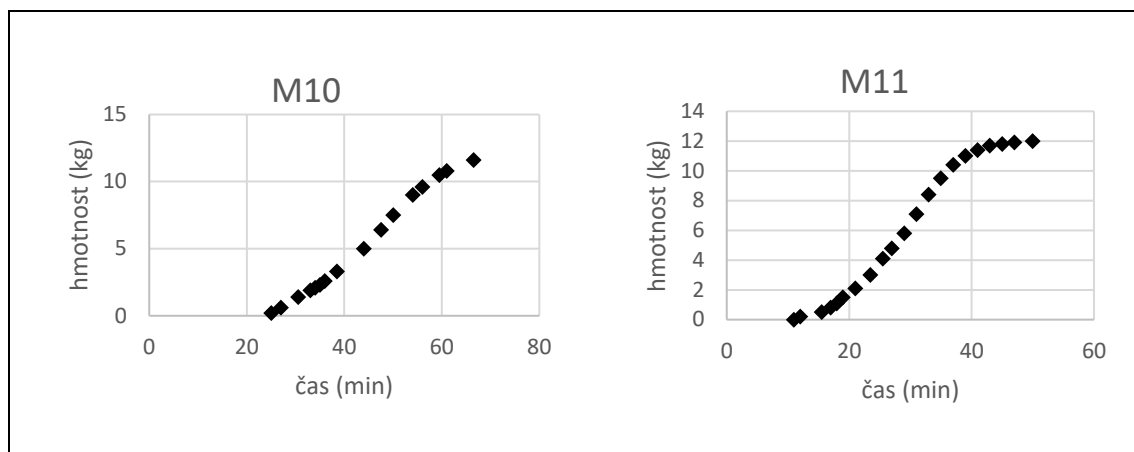
Obr. 8.8 Výsledky měření pro konfigurace M1; M2; M3 (sklon  $1,2^\circ$ )



Obr. 8.9 Výsledky měření pro konfigurace M4; M5; M6 (sklon 2,2 °)



Obr. 8.10 Výsledky měření pro konfigurace M7; M8; M9 (sklon 3,1 °)



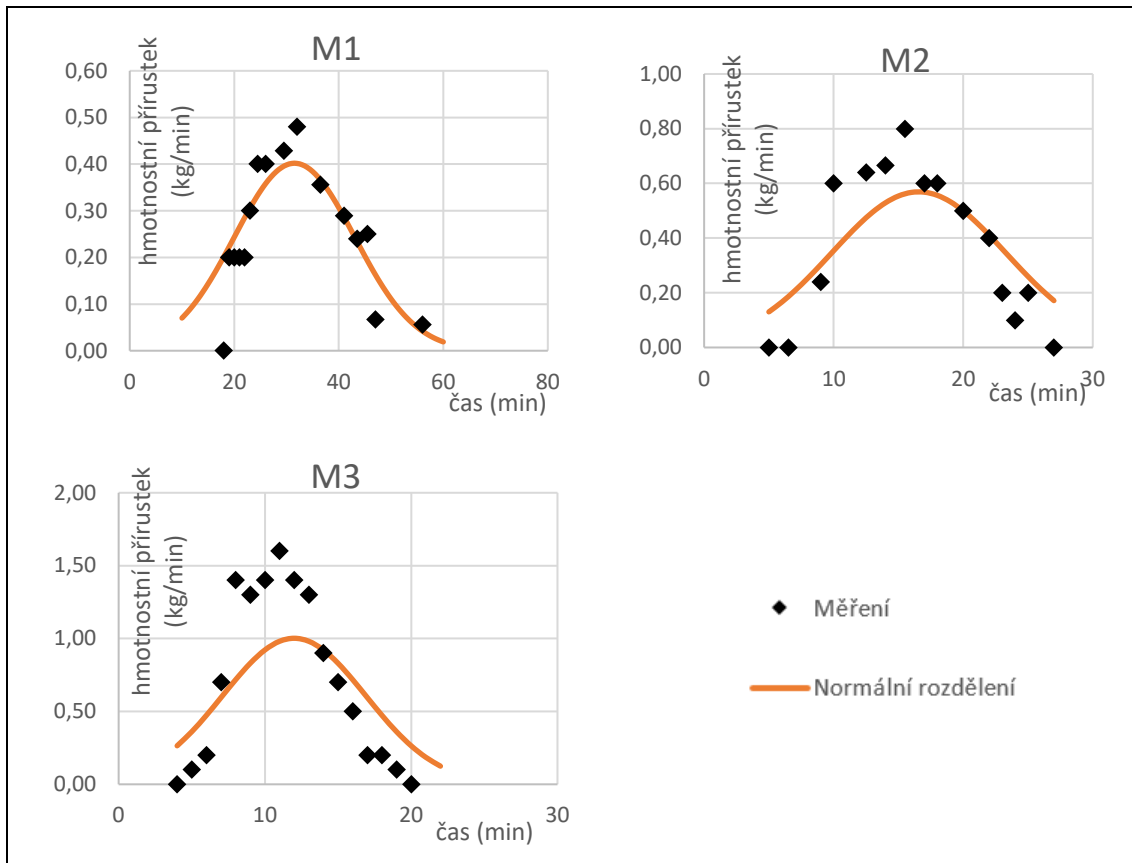
Obr. 8.11 Výsledky měření pro konfigurace M10; M11 (vlhký materiál)

### 8.2.3 Určení zdržné doby materiálu

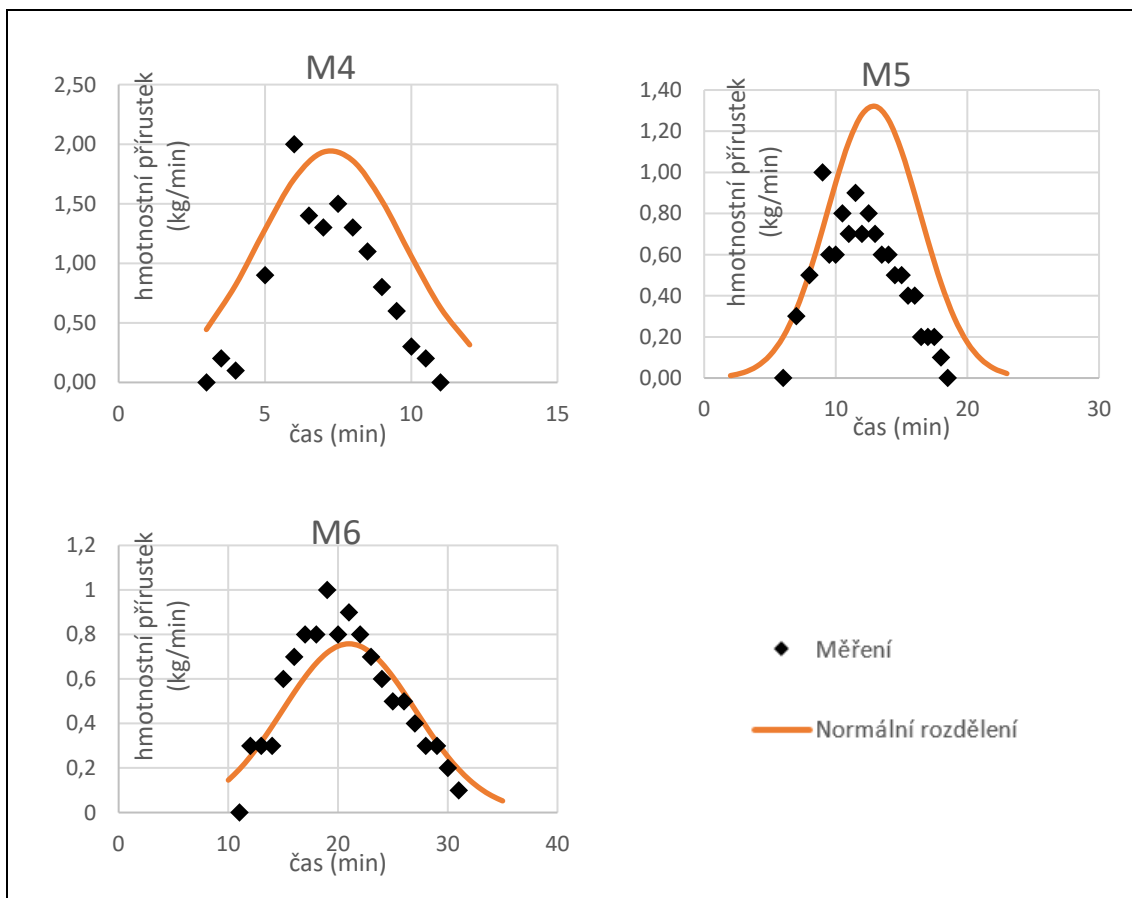
Vzhledem k tomu, že výsledky měření vzhledem připomínají graf distribuční funkce normálního neboli Gaussova rozdělení, bylo provedeno posouzení shody mezi náhodným rozdělením a naměřenými daty. Toto porovnání se nazývá test normality. Existuje více variant testů normality, avšak za nejvhodnější byl zvolen Lillieforsův test [18]. Tento test je dostupný formou kalkulatoru na webové stránce in-sicilo.net [19]. Pomocí tohoto kalkulatoru byly všechny data posouzeny jako data shodné s normálním rozdělením.

Díky tomu, že byla potvrzena shoda s normálním rozdělením, bylo možné grafy převést na závislosti hmotnostních přírůstků na čase a proložit je křivkami hustot normálního rozdělení. Křivka hustoty normálního rozdělení je dána rovnicí (8.3), kde  $x$  je čas,  $\mu$  je střední hodnota a  $\sigma$  rozptyl. Střední hodnoty a rozptyly byly zjištěny pomocí softwaru MS Excel, a to konkrétně pomocí funkcí PRŮMĚR() a SMODCH.P(), které byly aplikovány na časový interval odběru materiálu z rotační pece. Výsledné grafy proložené křivkou hustoty normálního rozdělení jsou vyobrazeny na obr. 8.12, obr. 8.13, obr. 8.14 a obr. 8.15.

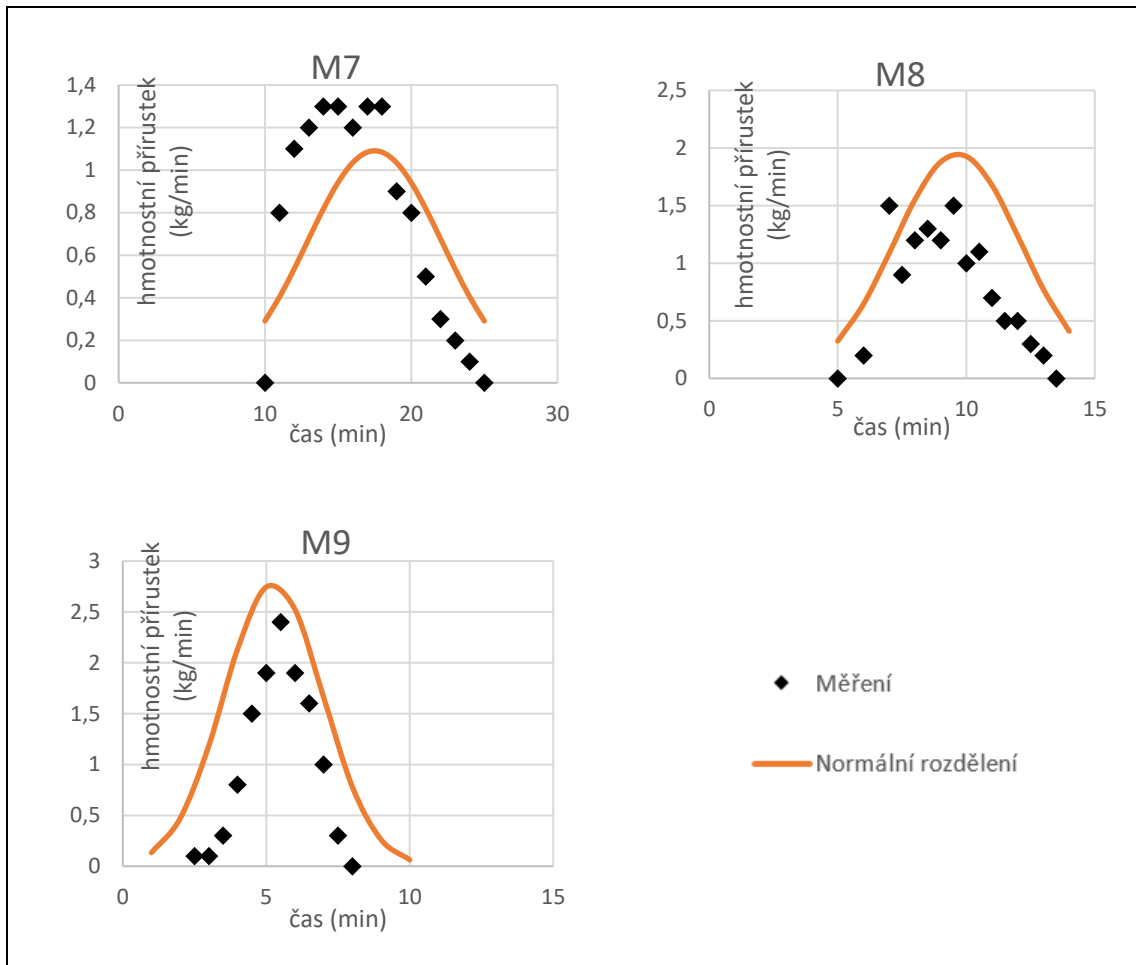
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (8.3)$$



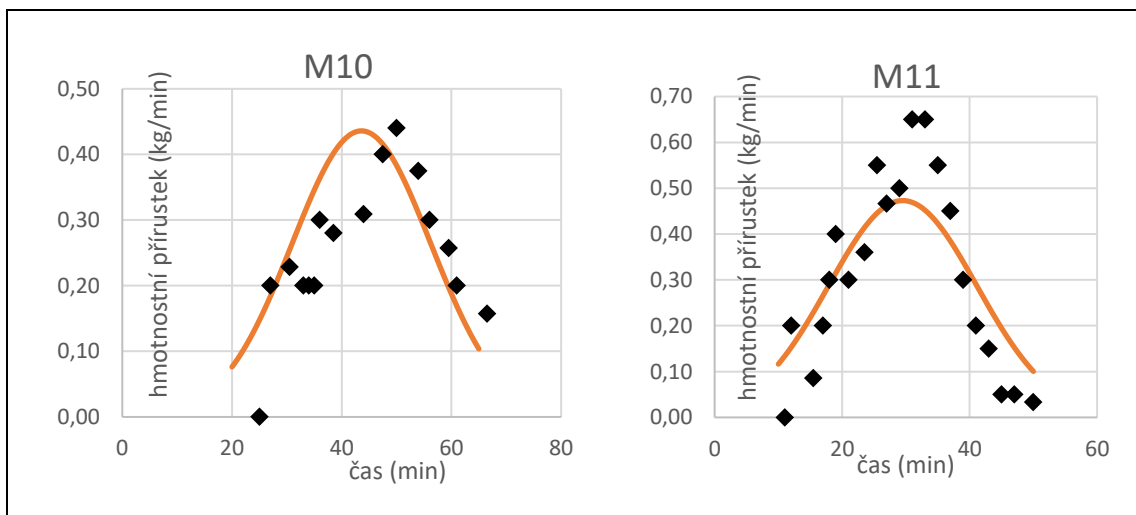
Obr. 8.12 Normální rozdění pro M1; M2; M3 (sklon 1,2 °)



Obr. 8.13 Normální rozdění pro M4; M5; M6 (sklon 2,2 °)



Obr. 8.14 Normální rozdělení pro M7; M8; M9 (sklon 3,1 °)



Obr. 8.15 Normální rozdělení pro M10; M11 (vlhký materiál)

Z grafů je patrné, že normální rozdělení opravdu odpovídá naměřeným hodnotám, a proto bylo toto rozdělení využito pro stanovení zdržné doby materiálu pro všechny konfigurace měření.

Zdržná doba byla určena jako rozdíl střední hodnoty normálního rozdělení a střední hodnoty času dávkování. Pro suchý materiál byla rychlost dávkování výrazně vyšší než

při dávkování materiálu se zvýšenou vlhkostí. Výsledný zdržný čas jednotlivých konfigurací je zobrazen v tab. 8.4.

Tab. 8.4 Vypočtený zdržný čas materiálu

Konfigurace	Střední čas dávkování (min)	Střední hodnota norm. rozdělení (min)	Zdržný čas (min)
M1	2	31,5	29,5
M2	0,5	16,6	16,1
M3	1	12	11,0
M4	1	7,3	6,3
M5	1	12,9	11,9
M6	1	21,0	20,0
M7	1	17,5	16,5
M8	1	9,7	8,7
M9	1	5,3	4,3
M10	6	29,5	23,5
M11	7	43,6	36,6

Teoretický výpočet zdržné doby materiálu v bubnu rotační pece lze provést podle různých hypotéz. Pro potřeby této práce byly zvoleny dvě.

První, uvedená ve zdroji [2] využívá rovnici (8.4).

$$T_1 = \frac{1,77 \cdot \sqrt{\beta} \cdot Z \cdot L}{\alpha \cdot n \cdot D} \quad (8.4)$$

Druhá hypotéza, podle její autorů též známá jako Perry-Chiltonova hypotéza [20], počítá zdržný čas materiálu podle rovnice (8.5). Přehled používaných veličin a jejich jednotek pro výpočet obou hypotéz je zobrazen v tab. 8.5.

$$T_2 = \frac{0,23 \cdot L}{D \cdot n^{0,9} \cdot \tan(\varphi)} \quad (8.5)$$

Tab. 8.5 Přehled dosazovaných veličin pro teoretický výpočet zdržné doby

Značka	Veličina	Jednotky
$T_1$	Zdržný čas dle 1. hypotézy	min
$T_2$	Zdržný čas dle 2. hypotézy	min
$\beta$	Sypný úhel materiálu	°
$Z$	Součinitel vestavby pece	-
$L$	Délka rotačního bubnu	m
$n$	Frekvence otáčení bubnu	ot/min
$D$	Vnitřní průměr bubnu	m
$\varphi$	Úhel sklonu bubnu	° pro (8.4) rad pro (8.5)

Hodnoty sypného úhlu  $\beta$  byly stanoveny dle [21] na 45° pro suchý materiál a 60° pro vlhký. Součinitel vestavby pece  $Z$  je roven 1 pro pec bez vnitřní vestavby a 0,5 pro lištovou výstavbu, což platí pro sušící pec využitou pro tento experiment. Ostatní

parametry již byly určeny. Výsledné teoretické časy zdržné doby materiálu v bubnu rotační peci jsou zobrazeny níže v tab. 8.6.

Tab. 8.6 Teoretické zdržné doby

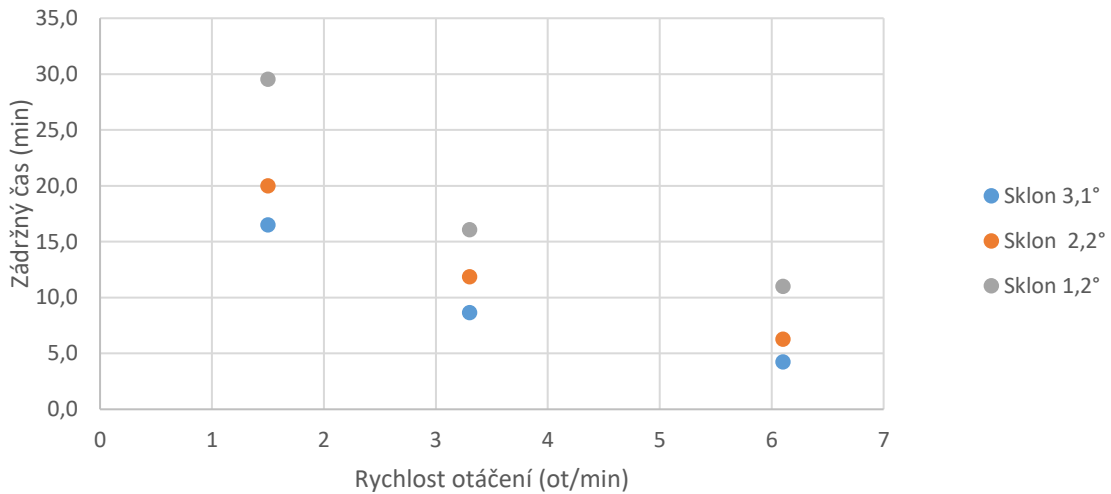
Konfigurace	Zdržný čas experimentální	% změna			% změna		
		$T_1$	$dT_1$		$T_2$	$dT_2$	
M1	29,53	23,09	6,44	<u>21,82</u>	53,36	23,83	80,69
M2	16,07	10,49	5,57	<u>34,68</u>	26,24	10,18	63,35
M3	11,00	5,68	5,32	48,39	15,10	4,10	<u>37,25</u>
M4	6,27	3,10	3,17	50,59	8,23	1,97	<u>31,36</u>
M5	11,87	5,72	6,15	51,77	14,31	2,44	<u>20,56</u>
M6	20,00	12,59	7,41	<u>37,03</u>	29,10	9,10	45,48
M7	16,50	8,94	7,56	45,84	20,64	4,14	<u>25,08</u>
M8	8,66	4,06	4,59	53,07	10,15	1,49	<u>17,27</u>
M9	4,25	2,20	2,05	48,29	5,84	1,59	<u>37,40</u>
M10	36,59	26,66	9,93	<u>27,15</u>	53,36	16,77	45,82
M11	23,50	12,12	11,38	48,44	26,24	2,74	<u>11,68</u>
		<b>Průměr</b>	<b>6,33</b>	<b>42,46</b>	<b>Průměr</b>	<b>7,12</b>	<b>37,81</b>

Obě použité hypotézy dávají velmi rozdílné výsledky. Zatímco první hypotéza předpokládá rychlejší průběh materiálu rotační pecí, než tomu bylo v praxi, hypotéza druhá předvídá naopak pomalejší pohyb materiálu. Jedná se o velké rozdíly mezi jednotlivými výsledky, které jsou způsobeny nedostatečným zahrnutím vlastností konkrétního materiálu a konkrétního konstrukčního řešení lištové vestavby rotační pece. Obě hypotézy lze využít pro orientační výpočet, avšak pro přesný výpočet by bylo potřeba využít komplexnější model nebo rovnici popisující závislost zdržné doby materiálu na sklonu a frekvenci otáčení bubnu konkrétní rotační pece. Odvození takovéto rovnice pro použití sypaného materiálu bude provedeno v následující části.

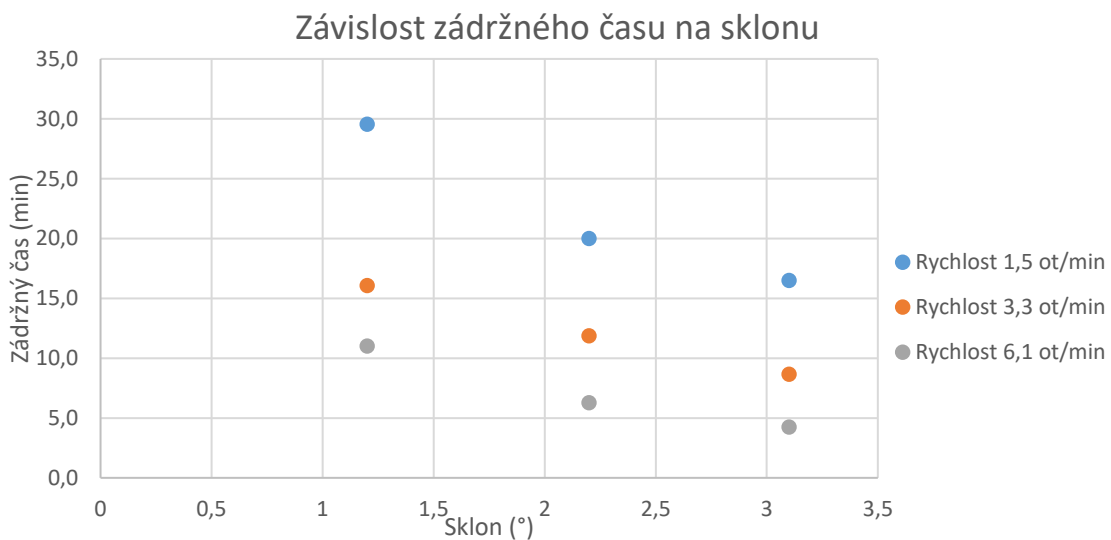
#### 8.2.4 Závislost zdržné doby na frekvenci otáčení a sklonu bubnu

Na obr. 8.16 a obr. 8.17 jsou vyobrazeny závislosti zdržného času na otáčení, resp. Na sklonu rotačního válce. Jak již bylo zmíněno, do tohoto porovnání byly zahrnuty pouze konfigurace M1 až M9, při kterých byla použita suchá vsázka. Na první pohled je patrné, že zvýšení obou těchto parametrů vede ke snížení zdržné doby, jedná se tedy o nepřímou úměru.

Závislost zádržného času na frekvenci otáčení



Obr. 8.16 Závislost zdržné doby na frekvenci otáčení bubnu



Obr. 8.17 Závislost zdržné doby na sklonu bubnu

Pro prvotní posouzení vlivu frekvence otáčení a sklonu bubnu rotační pece byla použita korelace v softwaru MS Excel pomocí příkazu CORREL(). Pomocí korelace lze zjistit, zda existuje závislost mezi jednotlivými parametry vstupující do korelační analýzy, v našem případě zdržná doba, frekvence otáčení a sklon bubnu rotační pece [22]. Výsledky korelační analýzy jsou zobrazeny v tab. 8.7.

Tab. 8.7 Korelační analýza

	Úhel	Frekvence otáčení
Zdržná doba	-0,50736	-0,80019

Mínusové hodnoty vypovídají o nepřímé úměře mezi zdržnou dobou a sklonem, popř. frekvencí otáčení bubnu. Vyšší hodnota korelace u frekvence otáčení prokázala, že se jedná o významnější parametr a má tedy větší vliv na délku zdržné doby materiálu v bubnu rotační pece.

Konkrétní vztah mezi zdržným časem, frekvencí otáčení a sklonu bubnu byl určen pomocí vícerozměrné lineární regrese. Hledaná rovnice je rovnice ve tvaru (8.6), přičemž  $x_1$  je sklon bubnu,  $x_2$  rychlost otáčení bubnu,  $y$  zdržný čas a  $a_r$ ,  $b_r$ ,  $c_r$ ,  $d_r$ ,  $e_r$  jsou koeficienty regresní rovnice.

$$y = a_r + b_r \cdot x_1 + c_r \cdot x_2 + d_r \cdot x_1^2 + e_r \cdot x_2^2 \quad (8.6)$$

Koeficienty regresní rovnice byly numericky určeny pomocí funkce Řešitel v softwaru MS Excel metodou minimalizace čtverců odchylek. Po dosazení koeficientů do obecné rovnice byla získána rovnice (8.7).

$$y = 50,64 + (-11,38) \cdot x_1 + (-9,27) \cdot x_2 + 1,54 \cdot x_1^2 + 0,79 \cdot x_2^2 \quad (8.7)$$

V tab. 8.8 se nachází porovnání zdržných časů získaných experimentem a zdržných časů vypočtených pomocí výše zmíněné regresní rovnice (8.7).

Tab. 8.8 Porovnání zdržných časů získaných odvozenou rovnicí

Konfigurace	Úhel (°)	Frekvence otáčení (ot/min)	Zdržný čas experimentální (min)	Zdržný čas teoretický (min)	Rozdíl zdržných časů (min)
M1	1,2	1,5	29,53	27,08	2,45
M2	1,2	3,3	16,07	17,27	1,20
M3	1,2	6,1	11,00	12,24	1,24
M4	2,2	6,1	6,27	6,09	0,18
M5	2,2	3,3	11,87	11,12	0,75
M6	2,2	1,5	20,00	20,93	0,93
M7	3,1	1,5	16,50	18,02	1,52
M8	3,1	3,3	8,66	8,21	0,45
M9	3,1	6,1	4,25	3,18	1,07
<b>Průměr</b>					1,09

Zdržné doby získané pomocí odvozené rovnice (8.7) se od experimentálních dat liší průměrně pouze o 1,09 min, což je pro predikci zdržné doby dostatečné. Nutno ještě jednou zdůraznit, že se jedná o rovnici odvozenou pro pec o konkrétních rozměrech, s konkrétní lištovou vestavbou a s použitím suchého sypkého materiálu. Pro jiné případy by bylo potřeba vytvořit rovnici novou na základě nových experimentálních dat, nebo použít jednu z obecných hypotéz pro výpočet zdržné doby materiálu.

### 8.2.5 Posouzení sušícího procesu

Přestože není hořák aktivní, dochází při průchodu materiálu rotační peci k sušicímu procesu. Proto byl v případech M10 a M11 použit jako vsázka vlhký písek, na kterém byla posouzena účinnost sušení bez aktivního hořáku. V laboratoři bylo pro vlhkou vsázku a oba vysušené produkty stanoveno množství sušiny (dle normy ČSN EN 12880) a ztráty žiháním (dle normy ČSN EN 15169). Na základě těchto dat bylo provedeno zhodnocení sušícího účinku. Obsah sušiny a vody ve vzorcích jsou zobrazeny v tab. 8.9 dále.

Tab. 8.9 Laboratorní výsledky analýzy vzorků konfigurací M10, M11

Vzorek.	Vlhká vsázka	Produkt M10	Produkt M11
Sušina (%)	96,31	99,66	99,61
Obsah vody (%)	3,69	0,34	0,39

Na základě hodnot uvedených v tab. 8.9 výše lze potvrdit, že k sušení dochází také samotným průchodem materiálu pecí bez nutnosti zahřívát sušící médium hořákem. Nutno podotknout, že sice došlo téměř k vysušení materiálu, ale vstupní vsázka obsahovala pouze necelé 4 procenta vody, což je na vsázku vstupující do sušícího procesu velmi nízká hodnota. V praxi se rotačních sušících pecí využívají pro sušení materiálu s obsahem vody dosahujících hodnot až 90 %. V těchto případech by sušení bez použití hořáku bylo velmi neefektivní.

Pro kompletnost byla s použitím hodnot z tab. 8.9 výše vytvořena jednoduchá materiálová bilance (viz tab. 8.10). Velké ztráty tvoří převážně ztráty způsobené úletem lehkých částic do rukávcového filtru a ulpívání vlhkého materiálu na dávkovači, k čemuž dochází nedokonalostí dávkovacího zařízení.

Tab. 8.10 Materiálová bilance sušení pro konfigurace M10, M11

konfigurace	M2	M4
množství vsázky (kg)	13,80	13,80
množství vody ve vsázce (kg)	0,51	0,51
množství produktu (kg)	11,60	12,00
množství vody v produktu (kg)	0,04	0,05
množství odpařené vody (kg)	0,47	0,46
ztráty (kg)	2,67	2,26

## 8.3 Experiment č. 2

### 8.3.1 Popis

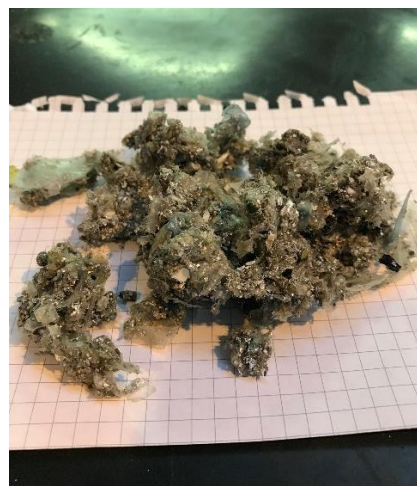
Cílem druhého experimentu bylo vytvořit materiálovou a tepelnou bilanci sušícího procesu.

#### Vsázka

Použitým materiálem byla vlhká směs drcených tetrapacků. Sušením je tato směs připravována na následné zpracování v pyrolýzních jednotkách. Materiál byl dodán externí společností v uzavřených plastových sudech (viz obr. 8.19), ve kterých bylo velké množství vody usazeno ve spodní části sudu. Obtížné zhomogenizování směsi vedlo k proměnlivé vlhkosti dávkovaného materiálu, což však nebylo posouzeno jako nevyhovující pro potřeby tohoto experimentu. Složení drcených tetrapacků bylo velmi různorodé (viz obr. 8.19). Směs byla tvořena převážně papírem a plasty o různých velikostech. Složení a měrná tepelná kapacita použitého materiálu jsou zobrazeny v tab. 8.11. Měrná tepelná kapacita  $c_{p_{tetrapack}}$  drceného tetrapacku, potřebná pro budoucí výpočet, byla určena dle rovnice (8.8).



Obr. 8.18 Sud s drceným tetrapackem



Obr. 8.19 Detail drceného tetrapacku

$$c_{p_{tetrapack}} = 0,75 \cdot c_{p_{papír}} + 0,2 \cdot c_{p_{polyethylen}} + 0,05 \cdot c_{p_{hliník}} \quad (8.8)$$

Tab. 8.11 Složení tetrapacků [23] [24]

Složky	Obsah (%)	$c_p$ (kJ/(kg·°C))
Papír	75	1,336
Polyethylen	20	1,900
Hliník	5	0,897
Tetrapack	100	1,427

Vlhkost vsázky byla v laboratoři stanovována opět podle norem ČSN EN 12880 (stanovení sušiny) a ČSN EN 15169 (ztráty žiháním). Jak již bylo zmíněno, vlhkost vsázky se podél výšky sudů, ve kterých byla uskladněna, měnila. V horní části sudu byl obsah vody stanoven na 57,7 procent, avšak ve spodní polovině již dosahoval extrémních hodnot až 91,14 procent. Po důkladném promíchání byla hodnota obsahu vody ve vsázce  $w_{vsz}$  stanovena na 74 procent.

### Nastavení rotační pece

Experimentální měření bylo provedeno na stejné rotační sušící peci jako při experimentu číslo 1, přičemž sklon bubny rotační pece byl nastaven na  $1,2^\circ$  a frekvence otáčení na hodnotu 1,3 ot/min. Dávkovací systém příslušící k rotační peci byl uznán za nevhodný pro dávkování drcených tetrapacků, tudíž byl tento systém odinstalován a dávkování bylo po dobu experimentu prováděno ručně. Pro potřeby experimentu bylo zvoleno dávkování  $\dot{m}_{vsz} = 30$  kg/h.

Rotační pec byla spuštěna, začalo dávkování vsázky a po dvou hodinách provozu byla dosažena požadovaná teplota spalin  $T_{spal}$  opouštějících rotační pec  $190^\circ\text{C}$ . Při těchto podmínkách byla rotační pec udržována dalších 60 minut. Během této doby byly odebírány vzorky produktu, měřeny tepelné ztráty pláště bubny rotační pece a získávány další informace potřebné pro vytvoření materiálové a tepelné bilance tohoto procesu. Po ukončení měření byla rotační pec samovolně ochlazována při minimální frekvenci otáčení a poté zastavena. Zpracování získaných dat bylo provedeno v softwaru MS Excel.

### 8.3.2 Materiálová bilance

První částí tohoto experimentu bylo vytvořit materiálovou bilanci probíhajícího sušícího procesu. Rovnice popisující materiálovou bilanci je rovnice (8.9), kde  $\dot{m}_{vsz}$  je hmotnostní tok vsázky,  $\dot{m}_{prod}$  hmotnostní tok vysušeného produktu,  $\dot{m}_{odp}$  hmotnostní tok odpařené vody ve spalinách a  $\dot{m}_{ztr}$  jsou zbylé hmotnostní ztráty v systému.

$$\dot{m}_{vsz} = \dot{m}_{prod} + \dot{m}_{odp} + \dot{m}_{ztr} \quad (8.9)$$

Hmotnostní tok vsázky je množství dávkovaného materiálu 30 kg/h, zatímco hmotnostní tok vysušeného produktu byl experimentálně stanoven vážením a má hodnotu 6,86 kg/h. Hmotnostní tok odpařené vody ve spalinách byl dopočítán z rovnice (8.10). Hodnota vlhkosti vysušeného produktu  $w_{prod}$  byla stanovena v laboratoři stejným způsobem jako vlhkost vstupní vsázky a její hodnota je 2,02 %.

$$\dot{m}_{odp} = \dot{m}_{vsz} \cdot \frac{w_{vsz} - w_{prod}}{100 - w_{prod}} \quad (8.10)$$

Množství hmotnostních ztrát bylo poté vyjádřeno rovnicí (8.11) vycházející z bilanční rovnice (8.9). Hmotnostní ztráty jsou tvořeny převážně úletem lehkých částic spalinami do rukávového filtru. Jisté množství materiálu je zadržováno také v konstrukci samotné pece, převážně v její lopatkové vestavbě, avšak vzhledem k délce trvání experimentu a kontinuálnímu dávkování lze tyto ztráty zanedbat.

$$\dot{m}_{ztr} = \dot{m}_{vsz} - \dot{m}_{prod} - \dot{m}_{odp} \quad (8.11)$$

Výsledky materiálové bilance jsou zobrazeny v tab. 8.12, kde je zobrazeno také procentuální rozdělení vstupního hmotnostního toku na výstupu z rotační pece. Vzhledem k tomu, že vsázka obsahovala velké množství vody, pozorujeme velký úbytek hmotnosti materiálu vycházejícího z rotační pece. Hmotnostní ztráty vzniklé úletem materiálu nepřekračují očekávané hodnoty.

Tab. 8.12 Materiálová bilance

Hmotnostní toky	Označení	Hodnota (kg/h)	Podíl ke vsázce
Vsázka	$\dot{m}_{vsz}$	30	-
Produkt	$\dot{m}_{prod}$	6,85	22,8 %
Odpařená voda	$\dot{m}_{odp}$	22,04	73,5 %
Ztráty (úlet)	$\dot{m}_{ztr}$	1,11	3,7 %

### 8.3.3 Tepelná bilance

Druhou částí tohoto experimentu bylo vytvořit bilanci tepelnou. Tuto bilanci popisuje rovnice (8.12), kde  $\dot{Q}_{pal}$  je tepelný tok představující teplo dodávané do rotační pece hořákem,  $\dot{Q}_{mat}$  teplo odváděné materiálem,  $\dot{Q}_{výp}$  teplo potřebné pro odpaření vlhkosti ze vstupního materiálu,  $\dot{Q}_{spal}$  teplo odváděné spalinami a  $\dot{Q}_{ztr}$  popisuje tepelné ztráty představující úniky tepla povrchem pláště rotační pece.

$$\dot{Q}_{pal} = \dot{Q}_{mat} + \dot{Q}_{výp} + \dot{Q}_{spal} + \dot{Q}_{ztr} \quad (8.12)$$

V následující části diplomové práce bude popsán algoritmus výpočtu jednotlivých tepelných toků.

### Teplo dodávané hořákem – $\dot{Q}_{pal}$

Teplo dodávané hořákem je dáno množstvím spotřebovaného paliva. Hořák spaluje zemní plyn, jehož výhřevnost byla stanovena na 33,48 MJ/m<sup>3</sup> [25]. Před a po měření byla opsána hodnota plynoměru a po odečtení těchto hodnot byla zjištěna spotřeba zemního plynu  $\dot{V}_{pal}$  8,3 m<sup>3</sup>/h. Hodnota  $\dot{Q}_{pal}$  je potom určena dle rovnice (8.13).

$$\dot{Q}_{pal} = LHV_{pal} \cdot \dot{V}_{pal} \quad (8.13)$$

### Teplo odvedené materiálem – $\dot{Q}_{mat}$

Hodnota tepla odváděného materiálem byla určena pomocí vztahu (8.14). Součet  $\dot{m}_{prod}$  a  $\dot{m}_{ztr}$  určuje množství drcených tetrapacků odvádějících teplo z rotační pece (formou produktu a úletu),  $c_{p_{tetrapack}}$  je měrná tepelná kapacita tetrapacků určená dle rovnice

**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a rozdíl teplot  $T_{prod}$  a  $T_{out}$  je rozdíl teploty produktu a teploty okolí neboli teploty, na které byla vsázka ustálena. Teplota odcházejícího produktu byla 64 °C a teplota okolí byla v průběhu zkoušek 22,5 °C.

$$\dot{Q}_{mat} = (\dot{m}_{prod} + \dot{m}_{ztr}) \cdot c_{p_{tetrapack}} \cdot (T_{prod} - T_{out}) \quad (8.14)$$

### Úniky tepla přes plášť bubnu – $\dot{Q}_{ztr}$

Tepelné ztráty pláštěm bubnu rotační pece byly určeny po konzultaci dle metodiky uvedené v Revue des Materiaux [26] a to dle rovnice (8.15). Součinitel  $\alpha$  je součinitel zahrnující vliv sálání a konvekce,  $A_{pl}$  je povrch pláště a  $T_{pl}$  je teplota vnějšího povrchu pláště.

Jelikož je plášť rotační pece členitý a různě tepelně izolovaný, bylo zapotřebí výpočet tepelných ztrát rozdělit a vypočítat tepelné ztráty jednotlivých úseků pláště separátně. Výsledná hodnota úniku tepla pláštěm bubnu rotační pece byla poté získána součtem dílčích tepelných ztrát.

$$\dot{Q}_{ztr} = \sum_{i=1}^8 \dot{Q}_{ztr_i} = \sum_{i=1}^8 \alpha_i \cdot A_{pl_i} \cdot (T_{pl_i} - T_{out}) \quad (8.15)$$

Schéma s vnějšími rozměry pláště rotační pece je zobrazeno na obr. 8.20. Číslice 1 až 7 označují jednotlivé sekce pláště rotační pece a sekce číslo 8 je jedno z čel rotační pece (čelo naproti hořáku), které musí být také zohledněno. Druhé z čel, čelo v místě lokace hořáku, vykazuje vlivem minimálního kontaktu s horkým médiem zanedbatelné tepelné ztráty rotační pece a může být tedy zanedbáno. Výpočet válcových plášťových ploch pro sekce 1 až 7 je proveden podle rovnice (8.16) a výpočet plochy čela bubnu rotační pece pak podle rovnice (8.17). Výsledky jsou zobrazeny v tab. 8.13.

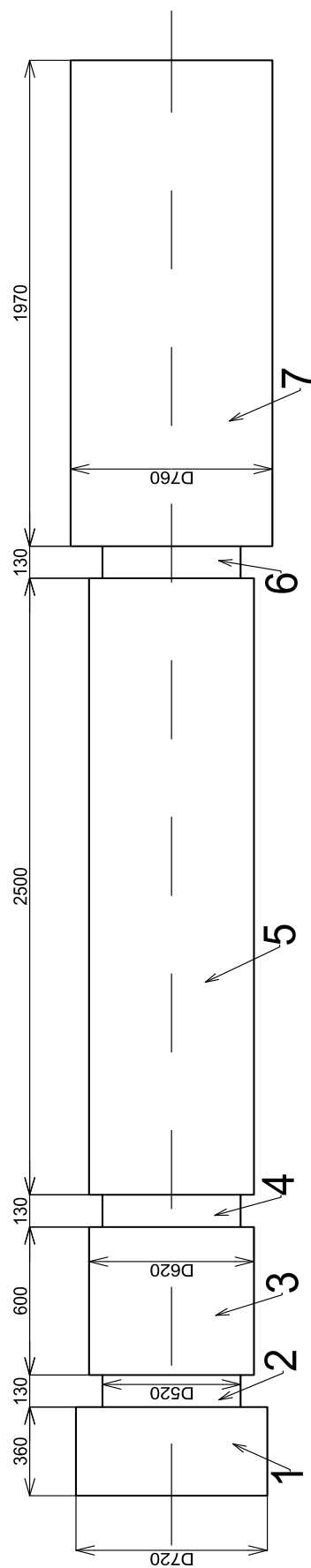
$$A_{pl_i} = \pi \cdot d_{pl_i} l_{pl_i} \quad (8.16)$$

$$A_{pl_8} = \frac{\pi \cdot d_{pl_8}^2}{4} \quad (8.17)$$

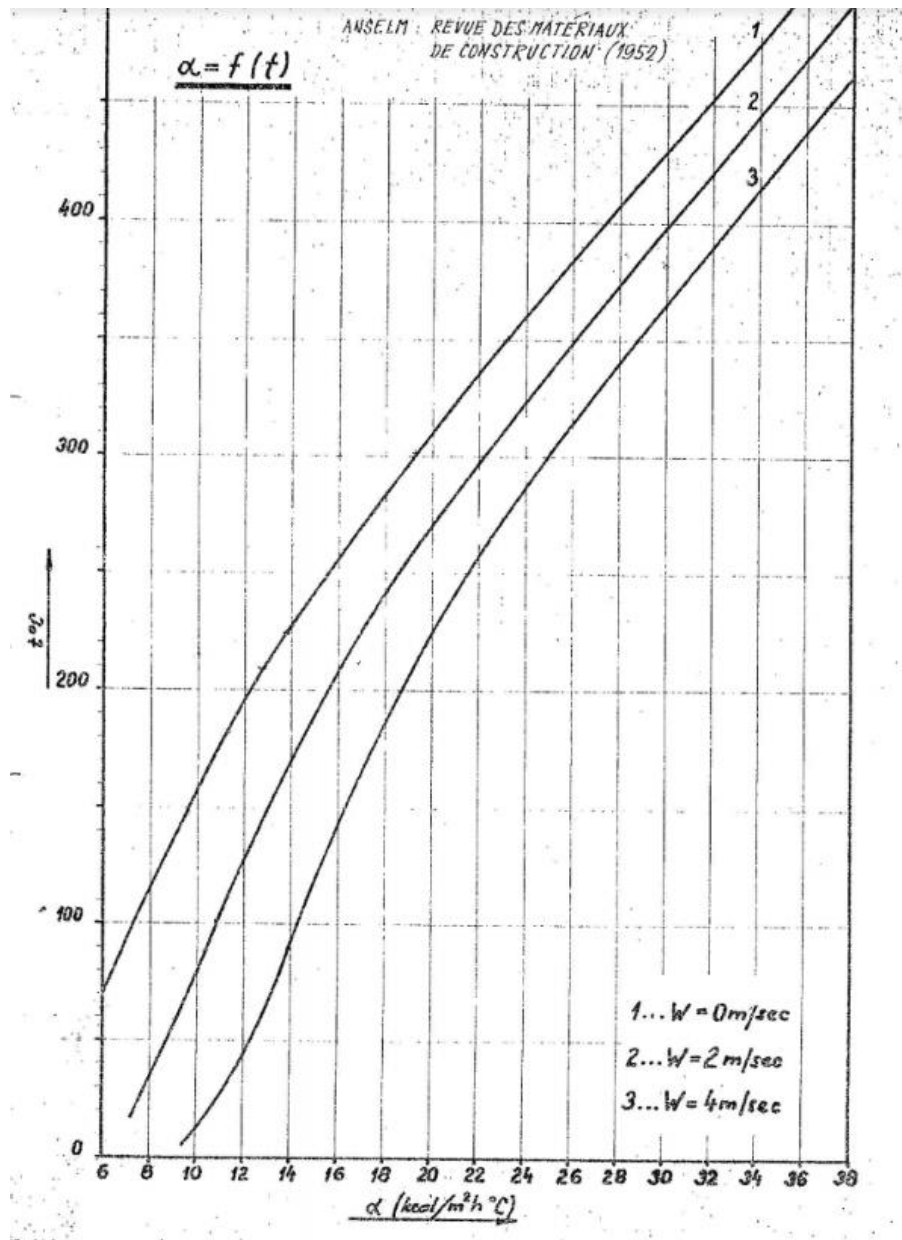
Tab. 8.13 Geometrie pláště rotační pece

$i$	$d_{pl_i}$ (mm)	$l_{pl_i}$ (mm)	$A_{pl_i}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{pl_i}$ (m <sup>2</sup> )
1	720	360	814300,8	0,814301
2	520	130	212371,7	0,212372
3	620	600	1168672	1,168672
4	520	130	212371,7	0,212372
5	620	2500	4869469	4,869469
6	520	130	212371,7	0,212372
7	760	1970	4703593	4,703593
8 = Čelo	800		502654,8	0,502655

Během měření byly průběžně zaznamenávány teploty z povrchů jednotlivých sekcí pláště a jejich průměrná hodnota je zapsána v tab. 8.14. Tyto teploty byly důležité nejen pro vyčíslení rovnice (8.15), ale také pro zjištění součinitele sálání a konvekce  $\alpha_i$ . Hodnoty tohoto součinitele byly odečteny z grafu zobrazeném na obr. 8.21, kde na ose y byly vynášeny teploty z povrchů jednotlivých sekcí pláště  $T_{pl_i}$  a po jejich protnutí s křivkou 1 byla z osy x odečtena hodnota součinitele  $\alpha_i$ . Křivka 1 byla vybrána vzhledem k umístění rotační pece uvnitř budovy, tudíž nedochází k vnějšímu chlazení rotační pece proudícím vzduchem. Po získání všech hodnot  $\alpha_i$  mohly být vypočteny tepelné ztráty jednotlivých sekcí  $\dot{Q}_{ztr_i}$  a celkové tepelné ztráty povrchem pláště  $\dot{Q}_{ztr}$ . Výsledky jsou vyobrazené v tab. 8.14.



Obr. 8.20 Schéma pláště rotační pece



Obr. 8.21 Závislost součinitele sálání a konvekce na teplotě povrchu [26]

Tab. 8.14 Výsledné tepelné ztráty pláště

$i$	$T_{pl_i}$ (°C)	$\alpha_i$ (kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C))	$\dot{Q}_{ztr_i}$ (kcal/hod)	$\dot{Q}_{ztr_i}$ (W)
1	73,67	6	249,99	290,74
2	103,33	7,5	128,75	149,74
3	29,33	6	47,92	55,73
4	80,5	6,5	80,06	93,11
5	31,42	6	260,52	302,98
6	109,67	7,8	144,39	167,93
7	35	6	352,77	410,27
8 = Čelo	148,67	9,7	615,16	715,43
			$\dot{Q}_{ztr} = 1879,56$	2185,92

**Výparné teplo –  $\dot{Q}_{výp}$** 

Teplo, které je spotřebováno na odpaření vody z vlhkého materiálu, je stanoveno podle rovnice (8.18), ve které, mimo množství odpařené vody  $\dot{m}_{odp}$ , vystupuje také měrné skupenské teplo vody  $l_{vH_2O}$ . Hodnota  $l_{vH_2O}$  byla stanovena 2257 kJ/kg. [27]

$$\dot{Q}_{výp} = l_{vH_2O} \cdot \dot{m}_{odp} \quad (8.18)$$

**Teplo odvedené spalinami –  $\dot{Q}_{spal}$** 

Množství tepla, které je odvedeno spalinami bylo poté určeno rovnicí (8.19) vycházející z bilanční rovnice (8.12).

$$\dot{Q}_{spal} = \dot{Q}_{pal} - \dot{Q}_{mat} - \dot{Q}_{ztr} - \dot{Q}_{výp} \quad (8.19)$$

**Výsledky tepelné bilance**

V tab. 8.15 jsou zobrazeny výsledné hodnoty jednotlivých tepelných toků a je zde také vyjádřen podíl jednotlivých výstupů z bilance k jejímu jedinému vstupu, jímž je teplo dodávané do soustavy hořákem. Pro podmínky, během kterých bylo měření prováděno, představuje teplo odváděné spalinami dominantní tepelný tok. Druhým výrazným, avšak již menším teplem je teplo výparné. Tepelné ztráty povrchem rotační pece a teplo odvedené z pece materiálem dosahují minimálních hodnot v porovnání s teplem dříve zmíněnými.

Tab. 8.15 Tepelná bilance

Teplo	Zkratka	Hodnota (kW)	Podíl ke vstupu
Dodané palivem	$\dot{Q}_{pal}$	77,17	
Odvedené spalinami	$\dot{Q}_{spal}$	61,04	79,1 %
Výparné teplo	$\dot{Q}_{výp}$	13,82	17,9
Úniky povrchem pláště	$\dot{Q}_{ztr}$	2,19	2,8 %
Odvedené materiálem	$\dot{Q}_{mat}$	0,13	0,2 %

## 9 Závěr

Rotační pece jsou zařízení s uzavřeným a izolovaným pracovním prostorem, ve kterém dochází k tepelnému zpracování vstupní vsázky. Rotační pece primárně rozdělujeme na rotační pece sušící a sintrovací. Rotační sušící pece využívají teplo k odstraňování vlhkosti ze vstupního materiálu, zatímco rotační sintrovací pece působením vysokých teplot mění strukturu vsázky. Hlavním rozdílem mezi jednotlivými typy je tedy vnitřní teplota, při které rotační pece pracují. Tímto faktem se od sebe sušící a sintrovací rotační pece odlišují a popisem těchto odlišností, konstrukčním řešením a praktickým využitím rotačních pecí je věnována první část této práce.

Dále je v diplomové práci zpracován přehled různých technologických uspořádání rotačních pecí. Jedná se o velmi univerzální zařízení a správná volba technologického uspořádání má zásadní vliv na její účinnost a mnohdy také samotnou funkčnost. Rotační pece nabízí velké množství aplikací, avšak například špatná volba mezi souproutým a protiproutým uspořádáním rotační pece může mít nežádoucí účinky na celý technologický proces.

Závěr práce se zabývá experimentálními měřeními, které byly provedeny v rámci diplomové práce na rotační sušící peci patřící Ústavu procesního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Tyto měření byly rozděleny do dvou experimentů, přičemž každý z těchto experimentů byl prováděn za jiným účelem.

První z experimentů se skládal celkem z 11 měření a předmětem zkoumání byla zdržná doba konkrétního materiálu v bubnu rotační pece v závislosti na měněné frekvenci otáčení a sklonu bubnu rotační pece. Výstupem byla experimentálně zjištěná zdržná doba, která byla následně porovnána se zdržnou dobou určenou pomocí teoretických vztahů. Byly stanoveny závislosti zdržné doby na frekvenci otáčení, respektive na sklonu, bubnu rotační pece. Bylo prokázáno, že frekvence otáčení má na délku zdržné doby větší vliv než sklon bubnu rotační pece. Nakonec byla z naměřených dat odvozena regresní rovnice popisující závislost zdržné doby použitého materiálu na frekvenci otáčení a sklonu bubnu rotační pece.

Výstupem druhého experimentu byla materiálová a tepelná bilance procesu sušení konkrétního materiálu, kterým byla směs drcených tetrapacků s vodou. Z materiálové bilance bylo vyjádřeno množství materiálových ztrát, které byly způsobeny převážně úletem lehkých částic do spalínového potrubí rotační pece. V rámci tepelné bilance bylo určeno množství tepla dodávané do systému rotační pece plynovým hořákem. Byly zjištěny tepelné ztráty povrchem pláště rotační pece a zároveň byla zjištěna distribuce tepla mezi materiálem a spalínami. Na základě provedených výpočtů bylo zjištěno, že téměř 80 procent tepla dodávaného hořákem odchází z rotační pece ve spalínách o teplotě přesahující hodnotu 190 °C. V laboratorních podmínkách je tato situace přijatelná, avšak v provozu by bylo vhodné teplo odcházející ve spalínách využít například k předehřevu spalovacího vzduchu.

Problematika rotačních pecí je velmi rozsáhlá a její podrobný popis by byl nad rámec této práce. Práce byla vypracována pro potřeby Ústavu procesního inženýrství a detailní zpracování jednotlivých konstrukčních prvků nebo probíhajících technologických procesů jsou náměty k dalšímu zpracování.

## 10 Bibliografie

- [1] PERAY, Kurt a Joseph WADDELL. *The rotary cement kiln*. 2. edice. Kalifornie: California Historical Society, 1986, 396 s. ISBN 0820603678.
- [2] BRUNNER, C.R. *Rotary Kiln Incineration Systems: Materiál ke školení EN-5006*. Houston, 2015. Dostupné také z: [http://www.pdhengeer.com/catalog/index.php?route=product/product&product\\_id=512](http://www.pdhengeer.com/catalog/index.php?route=product/product&product_id=512)
- [3] BOATENG, Akwasi. *Rotary kilns transport phenomena and transport processes*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-008-0557-120.
- [4] *Cement Kilns: Britain's First Rotary Kiln* [online]. b.r. [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: <http://www.cementkilns.co.uk/cemkilndoc012.html>
- [5] METSO CORPORATION, . *Brochure: Basics in Minerals Processing* [online]. In: . 10. 2015 [cit. 2017-11-18].
- [6] *The Rotary Kiln Handbook* [online]. In: . FEECO International, 2017 [cit. 2017-11-01].
- [7] SIMPSON, William. *Dry kiln operator's manual*. Revised. Madison, Wis: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. ISBN 01-603-5819-1.
- [8] HOLEČEK, Oldřich. *Sušení*. Praha: Ústav chemického inženýrství, VSCHT, b.r. Dostupné také z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/S.pdf>
- [9] *The Rotary Dryer Handbook* [online]. In: . FEECO International, 2017 [cit. 2017-11-01].
- [10] *Rotary kilns for cement plants: Brochure* [online]. In: . FLSmidth Inc, 2014 [cit. 2018-03-18].
- [11] METSO CORPORATION, . *Brochure: Burner systems for rotary kilns* [online]. In: . USA, 2012 [cit. 2017-11-18].
- [12] MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. Vyd. 3. přeprac. Brno: PC-DIR, 1998. ISBN 80-214-1264-X.
- [13] *Skripta: Životní prostředí (IZOZP)* [online]. In: . Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, b.r. [cit. 2018-02-26].
- [14] Preventing Buildup With Knocking Systems. In: *FEECO* [online]. USA: FEECO International, 2017 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://feeco.com/preventing-buildup-with-knocking-systems/>

- [15] Knocking Systems. In: *FEECO* [online]. USA: FEECO International, 2017 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://feeco.com/knocking-systems/>
- [16] Indirect-Heating Continuous Rotary Kiln. In: *Noritake* [online]. 2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.noritake.co.jp/eng/products/eeg/heat/kiln/rotary/indirect.html>
- [17] Fotografie slínku. In: *Wikipedia* [online]. b.r. [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/LDClinkerScaled.jpg>
- [18] KOTLORZ, Lukáš. *Testy normality*. Praha, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce Prof. RNDR. Jiří Anděl, DrSc.
- [19] Lilliefors test for normality. *In-silico* [online]. b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://in-silico.net/tools/statistics/lillieforstest>
- [20] YLINIEMI, Leena. *Advanced control of a rotary dryer*. Oulu: University of Oulu, 1999. ISBN 95-142-5281-0.
- [21] GAJDŮŠEK, Jaroslav a Miroslav ŠKOPÁN. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988.
- [22] Korelace a regrese. In: *Mendelova univerzita v Brně: Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. Brno, b.r. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [http://user.mendelu.cz/drapela/Statisticke\\_metody/Prezentace/zakladni/Korelace\\_Regrese.pdf](http://user.mendelu.cz/drapela/Statisticke_metody/Prezentace/zakladni/Korelace_Regrese.pdf)
- [23] Polyethylene. *Goodfellow* [online]. b.r. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/E/Polyethylene-High-density.html>
- [24] Specific Heat of Solids. *The Engineering ToolBox* [online]. b.r. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)
- [25] Výhřevnost paliv. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [26] *ANSELM, Wilhelm: Tepelné výpočty cementářských a vápenických rotačních pecí*. Heidelberg: Revue des matériaux de construction, 1952, (448).
- [27] Měrné skupenské teplo. *Wikipedie* [online]. b.r. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Brn%C3%A9\\_skupensk%C3%A9\\_teplo\\_varu](https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Brn%C3%A9_skupensk%C3%A9_teplo_varu)

## 11 Seznam symbolů a zkratek

$A_{pl}$	-	Povrch pláště	$m^2$
$a$	-	Výška opory 1	cm
$a_r$	-	Koeficient regresní rovnice	-
$b$	-	Výška opory 2	cm
$b_r$	-	Koeficient regresní rovnice	-
$c_p$	-	Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
$c_{p\text{hliník}}$	-	Měrná tepelná kapacita hliníku	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
$c_{p\text{papír}}$	-	Měrná tepelná kapacita papíru	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
$c_{p\text{polyethylen}}$	-	Měrná tepelná kapacita polyethylenu	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
$c_{p\text{tetrapack}}$	-	Měrná tepelná kapacita tetrapacků	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
$c_r$	-	Koeficient regresní rovnice	-
$D$	-	Vnitřní průměr bubnu	m
$d_{pl}$	-	Vnější průměr pláště	m
$d_r$	-	Koeficient regresní rovnice	-
$e_r$	-	Koeficient regresní rovnice	-
$L$	-	Délka bubnu	m
$LHV_{pal}$	-	Výhřevnost paliva	$\text{MJ}/\text{m}^3$
$l$	-	Vzdálenost mezi oporami 1 a 2	cm
$l_{pl}$	-	Délka pláště	m
$l_{v\text{H}_2\text{O}}$	-	Skupenské teplo vody	$\text{kJ}/\text{kg}$
$\dot{m}_{odp}$	-	Hmotnostní tok odpařené vody	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{prod}$	-	Hmotnostní tok produktu	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{vsz}$	-	Hmotnostní tok vsázky	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{ztr}$	-	Hmotnostní tok úletu materiálu	$\text{kg}/\text{s}$
$n$	-	Frekvence otáčení bubnu	ot/min
$n_{krit}$	-	Kritická frekvence otáčení bubnu	ot/min
$\dot{Q}_{mat}$	-	Tepelný tok materiálu	kW
$\dot{Q}_{pal}$	-	Tepelný tok z paliva	kW
$\dot{Q}_{spal}$	-	Tepelný tok spalin	kW
$\dot{Q}_{výp}$	-	Výparné teplo	kW
$\dot{Q}_{ztr}$	-	Úniky tepla povrchem pláště	kW
$T_1$	-	Teoretická zdržná doba	min
$T_2$	-	Teoretická zdržná doba dle Perryho	min
$T_{out}$	-	Teplota okolí	$^\circ\text{C}$
$T_{pl}$	-	Teplota povrchu pláště	$^\circ\text{C}$
$T_{prod}$	-	Teplota produktu	$^\circ\text{C}$
$T_{spal}$	-	Teplota spalin	$^\circ\text{C}$
$\dot{V}_{pal}$	-	Spotřeba paliva	$\text{m}^3/\text{h}$
$W$	-	Rychlost větru	$\text{m}/\text{s}$
$w_{prod}$	-	Vlhkost produktu	%
$w_{vsz}$	-	Vlhkost vsázky	%
$x$	-	Čas (normální rozdělení)	min
$x_1$	-	Sklon bubnu (regresní rovnice)	$^\circ$
$x_2$	-	Frekvence otáčení bubnu (regresní rovnice)	ot/min
$Z$	-	Součinitel vestavby pece	-

$\alpha$	-	Součinitel sálání a konvekce	kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C)
$\beta$	-	Sypný úhel materiálu	°
$\mu$	-	Střední hodnota (normální rozdělení)	min
$\sigma$	-	Rozptyl (normální rozdělení)	min
$\varphi$	-	Úhel sklonu bubnu	°/rad
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Oxid hlinitý	
CaCO <sub>3</sub>	-	Uhličitan vápenatý (vápenec)	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Oxid železitý (hematit)	
HCl	-	Kyselina chlorovodíková	
HF	-	Kyselina fluorovodíková	
M1-11	-	Konfigurace měření (1. experiment)	
MS Excel	-	Microsoft Excel	
NO <sub>x</sub>	-	Oxidy dusíku	
PCDD	-	Dioxiny	
PCDF	-	Furany	
SiO <sub>3</sub>	-	Křemičitany	
SO <sub>2</sub>	-	Oxid siřičitý	
TOC	-	Celkový obsah organického uhlíku	
TZL	-	Tuhé znečišťující látky	
VUT	-	Vysoké učení technické	
ZEVO	-	Zařízení pro energetické využití odpadů	

## 12 Seznam obrázků

Obr. 2.1 První komínové pece (Kalifornie) [1] .....	10
Obr. 2.2 První Britská rotační pec [4].....	11
Obr. 3.1 Sintrovací rotační pece [6].....	12
Obr. 3.2 Sušící rotační pec [9] .....	14
Obr. 4.1 Schéma sintrovací rotační pece [6].....	15
Obr. 4.2 Schéma sušící rotační pece [9] .....	15
Obr. 4.3 Slévaná vyzdívka [6] .....	17
Obr. 4.4 Cihlová vyzdívka [6] .....	17
Obr. 4.5 Jízek rotačního válce [6].....	18
Obr. 4.6 Systém zvedacích lopatek [5].....	18
Obr. 4.7 Teplotní profil materiálového lože (vlevo); Obložení materiálového lože (vpravo) [6] .....	19
Obr. 4.8 Rotační mechanismus – řetězový [2].....	20
Obr. 4.9 Převodový mechanismus v praxi [4] .....	20
Obr. 4.10 Model převodového mechanismu [10].....	21
Obr. 4.11 Hořák (spol. Metso) [11] .....	22
Obr. 4.12 Vliv okysličení na tvar plamene [3] .....	24
Obr. 4.13 Dopravník spol. RATAJ a. s. (Foto autor) .....	25
Obr. 4.14 Kontejnery na popel [2].....	26
Obr. 4.15 Nádobna na popel .....	26
Obr. 4.16 Zařízení s uskladňovacími síly [2].....	26
Obr. 4.17 Dopravník na vlhký popel [2].....	26
Obr. 4.18 Rotační chladič [4].....	27
Obr. 4.19 Planetární chladič [4].....	28
Obr. 4.20 Planetární chladič v praxi [4].....	28
Obr. 4.21 Roštový chladič [4].....	29
Obr. 4.22 Schéma systému čištění spalin ZEVO Malešice [13].....	30
Obr. 4.23 Ball & Tube knocking systém (zleva – schéma, komora, prsten) [15] .....	31
Obr. 4.24 Kladivo knocking systému (zleva – schéma, kladivo) [15].....	31
Obr. 4.25 Schéma přehříváče [4] .....	32
Obr. 4.26 Soustava cyklón [3] .....	33
Obr. 4.27 Schéma předkalcinátoru [4].....	33
Obr. 5.1 Rotační pec s přímým vytápěním [4] .....	34
Obr. 5.2 Rotační pec s nepřímým ohřevem [16].....	35
Obr. 5.3 Řez rotační pecí s nepřímým ohřevem [9].....	35
Obr. 5.4 Schéma souproutého uspořádání [9].....	36
Obr. 5.5 Teplotní profil souproutého uspořádání [2] .....	36
Obr. 5.6 Schéma protiproudého uspořádání [9].....	37
Obr. 5.7 Teplotní profil protiproudého uspořádání [2].....	37
Obr. 6.1 Slínek [17] .....	38
Obr. 6.2 Schéma cementářské rotační pece [3] .....	39
Obr. 7.1 Mechanismy přenosu tepla v rotační peci [6].....	41
Obr. 7.2 Př. 1 – Teplotní profil slinutí (suchý materiál) [1] .....	42
Obr. 7.3 Př. 2 – Teplotní profil slinutí (vlhký materiál) [1].....	42
Obr. 7.4 Př. 3 – Teplotní profil slinutí s přehřívákem (suchý materiál) [1].....	43

Obr. 7.5 Př. 4 – Teplotní profil slinutí s předkalcinátorem (suchý materiál) [1].....	43
Obr. 8.1 Sušící pec (pohled 1) .....	44
Obr. 8.2 Sušící pec (pohled 2) .....	44
Obr. 8.3 Schéma technologie v softwaru Control Web .....	45
Obr. 8.4 Systém čištění spalin .....	45
Obr. 8.5 Rukávcový filtr .....	45
Obr. 8.6 Opora rotační pece.....	46
Obr. 8.7 Schéma měření úhlu sklonu bubnu.....	46
Obr. 8.8 Výsledky měření pro konfigurace M1; M2; M3 (sklon 1,2 °).....	48
Obr. 8.9 Výsledky měření pro konfigurace M4; M5; M6 (sklon 2,2 °).....	49
Obr. 8.10 Výsledky měření pro konfigurace M7; M8; M9 (sklon 3,1 °).....	49
Obr. 8.11 Výsledky měření pro konfigurace M10; M11 (vlhký materiál) .....	50
Obr. 8.12 Normální rozdělení pro M1; M2; M3 (sklon 1,2 °).....	51
Obr. 8.13 Normální rozdělení pro M4; M5; M6 (sklon 2,2 °).....	51
Obr. 8.14 Normální rozdělení pro M7; M8; M9 (sklon 3,1 °).....	52
Obr. 8.15 Normální rozdělení pro M10; M11 (vlhký materiál).....	52
Obr. 8.16 Závislost zdržné doby na frekvenci otáčení bubnu .....	55
Obr. 8.17 Závislost zdržné doby na sklonu bubnu .....	55
Obr. 8.18 Sud s drceným tetrapackem.....	58
Obr. 8.19 Detail drceného tetrapacku .....	58
Obr. 8.20 Schéma pláště rotační pece .....	62
Obr. 8.21 Závislost součinitele sálání a konvekce na teplotě povrchu [26] .....	63

## 13 Seznam tabulek

Tab. 4.1 Změna parametrů při použití zvedacích lišt [3].....	18
Tab. 8.1 Parametry sušící pece .....	44
Tab. 8.2 Použité úhly sklonu bubnu rotační pece .....	47
Tab. 8.3 Souhrn konfigurací pro první experiment .....	47
Tab. 8.4 Vypočtený zdržný čas materiálu.....	53
Tab. 8.5 Přehled dosazovaných veličin pro teoretický výpočet zdržné doby.....	53
Tab. 8.6 Teoretické zdržné doby .....	54
Tab. 8.7 Korelační analýza .....	55
Tab. 8.8 Porovnání zdržných časů získaných odvozenou rovnicí .....	56
Tab. 8.9 Laboratorní výsledky analýzy vzorků konfigurací M10, M11 .....	57
Tab. 8.10 Materiálová bilance sušení pro konfigurace M10, M11 .....	57
Tab. 8.11 Složení tetrapacků [23] [24] .....	58
Tab. 8.12 Materiálová bilance .....	59
Tab. 8.13 Geometrie pláště rotační pece.....	61
Tab. 8.14 Výsledné tepelné ztráty pláště .....	63
Tab. 8.15 Tepelná bilance.....	64